

Нелинейная акустика: достижения, перспективы, проблемы

О. В. Руденко ·

Олег Владимирович Руденко, доктор физико-математических наук, доцент кафедры общей физики и волновых процессов физического факультета Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова. Область научных интересов — физика нелинейных волн, акустика, взаимодействия света со звуком. Соавтор ряда монографий, изданных в нашей стране и за рубежом, в том числе: Теоретические основы нелинейной акустики (совместно с С. И. Солуяном). М., 1975; Нелинейная гидроакустика (совместно с Б. К. Новиковым и В. И. Тимошенко). Л., 1981. Лауреат Государственной премии СССР (1985 г.). В «Природе» опубликовал статью: Акустика интенсивных возмущений: нелинейные волны, физические эффекты и приложения (1978, № 9).

В современной научной и технической литературе все чаще встречается прилагательное «нелинейный». Стали уже привычными выражения «нелинейная волна», «нелинейный процесс», «нелинейная характеристика» и т. п. Это слово вошло в лексикон физиков в 30-е годы, когда бурно развивалась теория нелинейных колебаний, заложившая основу современной техники обработки сигналов. К концу 50-х — началу 60-х годов относится расцвет физики нелинейных волн, вызванный использованием интенсивного лазерного излучения и мощных СВЧ-генераторов, а также исследованием плазмы. На фоне ярких достижений в этих областях менее заметными были результаты нелинейной акустики, изучающей мощные звуковые, ультразвуковые и гиперзвуковые сигналы¹.

Нелинейная акустика — одно из старейших направлений физики нелинейных волн. В ней впервые обнаружены и описаны такие явления, которые, как оказалось позже, имеют весьма общий характер и наблюдаются в других разделах физики и техники. Весьма универсальны и разработанные здесь математические модели. Сама же нелинейная акустика до сравнительно недавнего времени выглядела наукой, занимающейся проблемами, прямо не связанными ни с познанием новых фундаментальных свойств материи, ни с решением актуальных народнохозяйственных задач. Впрочем, в студенческих учебниках неизменно обращались к ней, демонстрируя на красивых примерах основные особенности нелинейных волн — их способность изменять свою частоту и форму, распадаться на составные части, взаимодействовать друг с другом, а также влиять на свойства среды. Справедливости ради надо сказать, что и развивалась нелинейная акустика в те годы медленнее, чем, скажем, нелинейная оптика, где основные эффекты не только были установлены и поняты, но и

¹ Нелинейной акустикой называют область физики, изучающую взаимодействия акустических волн между собой и с волнами иной физической природы. Обычно такие явления (нелинейные эффекты) возникают при распространении звуковых волн большой интенсивности — так называемых волн конечной амплитуды — и проявляются тем сильнее, чем больше величина возмущений; они отсутствуют в линейном приближении, где выполняется принцип суперпозиции. Напомним также читателю, что упругие колебания с

частотами от 16 Гц до $2 \cdot 10^4$ Гц (слышимые человеком) принято называть звуковыми, от $2 \cdot 10^4$ Гц до 10^9 Гц — ультразвуковыми и от 10^9 Гц до 10^{13} Гц — гиперзвуковыми.

послужили основой промышленного внедрения буквально через несколько лет после создания лазеров.

Что ж, подчас ценность накопленных знаний становится очевидной не сразу, а лишь тогда, когда они проявят себя при решении важных прикладных задач.

Именно так и произошло с нелинейной акустикой. Сегодня, спустя 30 лет после появления первых работ созданы принципиально новые проблемы и измерительные методики, завоевавшие широкое признание в промышленности и различных областях научных исследований. Цикл работ «Разработка физических основ нелинейной акустики и ее приложений» удостоен в 1985 г. Государственной премии СССР.

Нелинейная акустика занимает особое место в физике по разнообразию сред, в которых протекают исследуемые процессы. Изучаемые ею волны возбуждаются в газах, жидкостях, твердых телах и плазме, т. е. присущи всем четырем известным состояниям вещества. Они широко распространены в природе: в атмосфере и океане, под землей и в космических объектах. Нелинейные волны — это и гром, и разрывы, и землетрясения, и многое другое.

Читатель вправе спросить: а имеет ли смысл говорить о нелинейной акустике как об отдельной науке, не правильной ли вести речь о «нелинейных разделах» физики Земли, атмосферы и океана, твердого тела и других состояний вещества? Тот же вопрос относится и к приложениям — неразрушающему контролю, борьбе с шумами, авиационной и гидроакустике. Ответить, пожалуй, можно так: нелинейная акустика четко выделена на общем «фоне» всех физических дисциплин спецификой своих идей, теоретических моделей и методов, а также техникой эксперимента. Но сегодня полученные в ней результаты уже вышли за рамки одной отрасли и широко используются специалистами разных направлений.

О становлении нелинейной акустики, основных этапах ее развития и достижениях начального этапа ее истории уже рассказывалось на страницах «Природы»². Последнее десятилетие характеризовалось главным образом смещением интересов в сторону прикладных аспектов, среди которых следует прежде всего упомянуть гид-

роакустику и нелинейную акустическую диагностику различных сред. Появились и новые направления исследований. Наконец, в значительной мере прояснилась ситуация в традиционных разделах нелинейной акустики, развиваемых уже много лет, так что для них можно подвести некоторые итоги и обсудить перспективы использования основных результатов. Обо всем этом и рассказывается ниже.

НЕЛИНЕЙНЫЕ ВОЛНЫ И ПРИЕМ ЗВУКОВЫХ СИГНАЛОВ

Это направление интересно с нескольких точек зрения. Его развитие отмечено логической последовательностью и могло бы служить классической иллюстрацией пути реализации новой научной идеи.

Принцип действия нелинейной (параметрической) антенны был предложен в 1961 г. В. А. Зверевым и А. И. Калачевым в нашей стране и независимо П. Вестервельтом в США. Он основан на свойстве интенсивных волн взаимодействовать между собой. Как известно, линейные (слабые) волны, пересекаясь в пространстве, не влияют друг на друга — для них справедлив известный принцип суперпозиции. Если же слабый сигнал встретит на своем пути мощный волновой пучок, произойдет «запоминание» характеристик сигнала, его «прием». Иными словами, такой пучок служит своеобразной антенной. Эта антенна способна не только принимать, но и испускать сигналы. Для этого нужно возбудить в среде, скажем в воде, интенсивную модулированную волну. Из-за нелинейного взаимодействия волн с различными частотами выделенным окажется низкочастотный сигнал модуляции, который, слабо затухая, может распространяться под водой на значительные расстояния. Важно, что такой сигнал передается узконаправленным пучком — ведь излучается он довольно-таки необычной «бестелесной антенной» — столбом воды протяженностью в десятки и даже сотни метров, в котором сконцентрирована энергия мощной волны (называемой волной накачки).

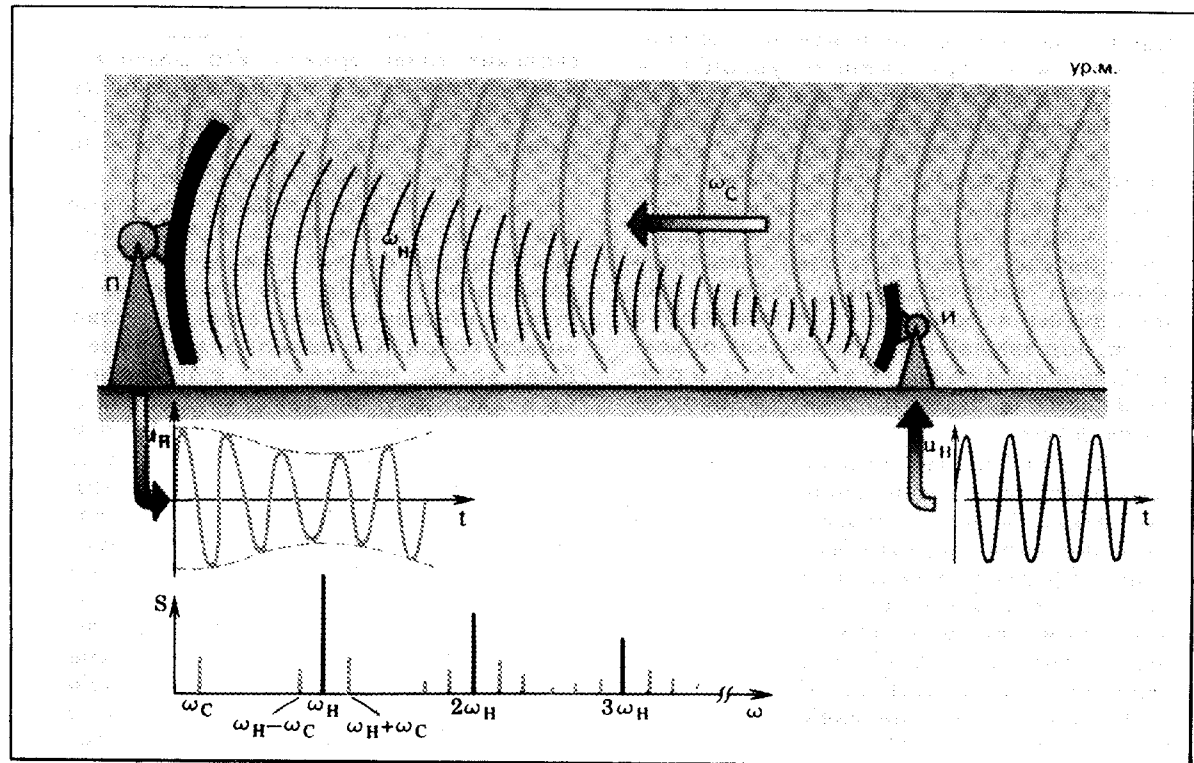
Первые расчеты и лабораторные эксперименты в этой области относятся к концу 60-х годов. Они позволили выяснить общие свойства нелинейных антенн. Затем наступил этап создания макетов устройств и натурных измерений в морских условиях. Одновременно разрабатывались инженерные методы расчета и оптимизации характеристик антенн на основе математического аппарата нелинейной акустики, раз-

² Красильников В. А. Ультразвук и нелинейные волновые процессы // Природа. 1968. № 1. С. 54—62; Руденко О. В. Акустика интенсивных возмущений: нелинейные волны, физические эффекты и приложения // Природа. 1978. № 9. С. 34—43.

витого академиком Р. В. Сихловым и его учениками³. В нашей стране впервые в мире созданы и внедрены приборы с параметрическими антеннами для гидролокации с целью обнаружения косяков рыбы, а также для изучения водной толщи и морского дна. Такие приборы позволяют очень точно построить профиль дна до глубин около 4 км, идентифицировать слои скальных пород, залегающие на глубине до 100 м под дном моря, находить предметы в илистых донных отложениях толщиной до 20 м. Область использования подобных приборов непре-

ривно расширяется. В ближайшее время ожидается их применение для поиска полезных ископаемых на шельфе, контроля загрязнения воды и нарастания донных отложений, для морской археологии и точных подводных измерений и т. д.

Как же работает параметрическая антенна? Уже говорилось, что слабый сигнал низкой частоты ω_c оставляет свой «нелинейный отпечаток» на мощном пучке накачки с высокой частотой ω_H . При этом изменяется как форма, так и спектр $S(\omega)$ высокочастотной волны. Обычно прием сла-



Принцип действия параметрической приемной антенны. Источник И испускает в направлении приемника П мощный пучок колебаний накачки с частотой ω_H и величиной u_H , меняющейся со временем t по гармоническому закону $u_H \sim \sin \omega_H t$. В среде между источником и приемником пучок взаимодействует со слабым сигналом низкой частоты [$u_c \ll u_H$, $\omega_c \ll \omega_H$]. Если этот сигнал распространяется почти параллельно пучку, напряжение на выходе приемника u_H оказывается промодулированным частотой ω_c , а сами высокочастотные колебания становятся негармоническими, так что принимаемый спектр $S(\omega)$ состоит из многих компонент (на рисунке показаны только самые низкочастотные из них), среди которых наиболее заметны гармоники $n\omega_H$, а наиболее интересны — отмеченные цветом компоненты с комбинационными частотами $n\omega_H \pm m\omega_c$, несущие информацию о сигнале [$n, m=1, 2, 3...$].

бых сигналов требует чувствительного спектрального анализа, поэтому особенно важна так называемая тонкая структура S , определяемая наличием в нем компонент (гармоник) с теми или иными частотами.

В нелинейных акустических средах скорость звуковых волн, как правило, почти не зависит от их частоты (дисперсия отсутствует), стало быть, нет и запрета на взаимодействие различных гармоник: лю-

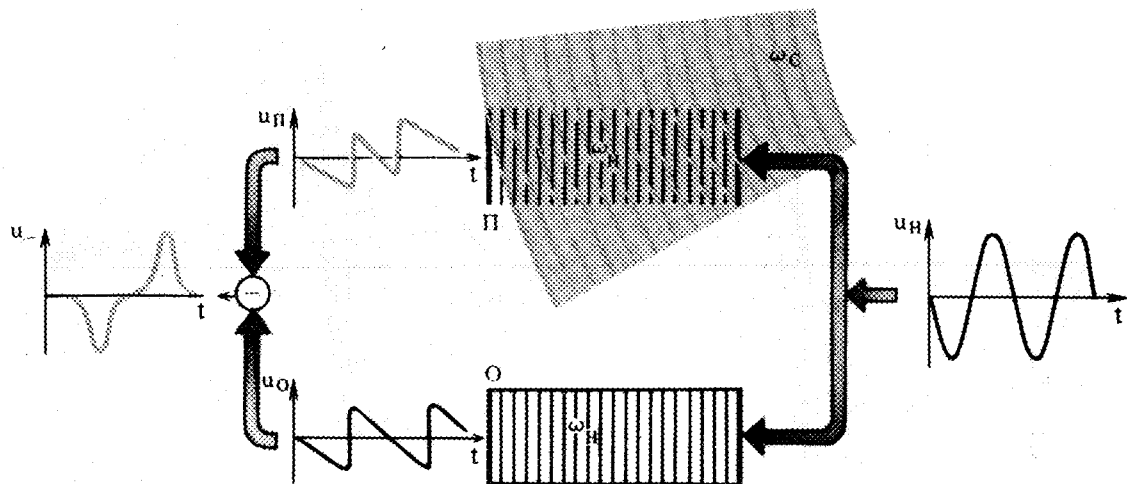
³ Эти методы описаны в книге: Новиков Б. К., Руденко О. В., Тимошенко В. И. Нелинейная гидроакустика. Л., 1981. Об уравнениях нелинейной акустики и следующих из них результатах см., напр.: Наугольных К. А. Поглощение мощных ультразвуковых волн // Мощные ультразвуковые поля / Под ред. Л. Д. Розенберга. М., 1968. С. 5—48.

бая из них присутствует в спектре, в результате чего энергия исходных колебаний «размазывается» по спектру. Дело в том, что при взаимодействии волн с частотами ω_c и ω_n образуются колебания с комбинационными частотами $n\omega_n \pm m\omega_c$ ($n, m = 1, 2, 3 \dots$). Каждое из этих колебаний обычно столь же слабо, как и исходный сигнал, — как говорят, волновое, или параметрическое, предусиление отсутствует, так что антенна лишь выделяет из принимаемых волн параллельные оси пучка и повышает их частоту.

это недостижимо. Но есть и специфические именно для акустики способы усиления сигналов.

Основная идея одного из таких способов⁴ — извлечь информацию о сигнале на всех комбинационных частотах, а не на какой-либо одной из них — ведь заметная часть принятого сигнала сосредоточена в высокочастотных компонентах спектра.

Обсудим принципиальную схему подобной обработки, приводящей к усилению принимаемого сигнала⁵. Пусть волны накачки распространяются в двух каналах:



Принцип действия приемника с параметрическим предусилением. Волна накачки $u_n \sim \sin \omega_n t$ распространяется в опорном О и приемном П каналах. В опорном канале, где на волну не действует сигнал с частотой ω_c , ее синусоидальный профиль трансформируется в пилообразный с симметричными относительно нулевого уровня фронтами. Из-за влияния сигнала на волну накачки в приемном канале образуются несимметричные фронты, движущиеся относительно сопутствующей системы координат. В результате форма возмущений на выходе каналов О и П оказывается различной, а величина u — разностного сигнала — гораздо больше, чем у любой спектральной компоненты с комбинационной частотой.

приемном (П) и опорном (О). Сигнал воздействует на волну накачки только в приемном канале, в опорном же канале она распространяется, не взаимодействуя с сигналом. Поэтому на выходе этого канала волна искажена только из-за самовоздействия, а в канале П дополнительно модулируется сигналом с частотой ω_c . Из-за нелинейности при этом образуются движущиеся несимметричные крутые (ударные) фронты и происходит сложная эволюция профиля волны, в частности, ее период изменяется. Вычитая сигналы на выходе каналов П и О, получим периодическую последовательность импульсов с амплитудой примерно как у волны накачки. Иными словами, в результате такой обработки достигается заметное усиление сигнала.

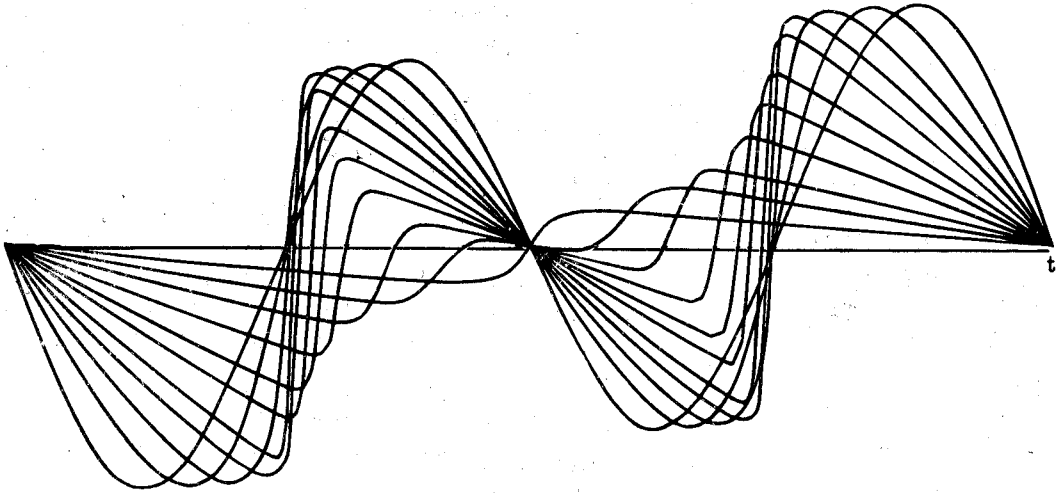
Казалось бы, возможности параметрических приемников звука сильно ограничены по сравнению с параметрическими усилителями других волн, испытывающих дисперсию при распространении в среде. Так, при резонансном взаимодействии трех электромагнитных волн с частотами ω_n , ω_c , $\omega_n - \omega_c$ удается добиться (например, в устройствах нелинейной оптики) значительного усиления сигнала на частотах ω_c и $\omega_n - \omega_c$ за счет передачи им энергии от волны накачки с частотой ω_n . В акустике же

⁴ Гурбатов С. Н., Малахов А. Н. // Акустический журн. 1979. Т. 22. С. 53—59.

⁵ Подробнее см.: Васильева О. А., Лапшин Е. А., Карабутов А. А. и др. Взаимодействие одномерных волн в средах без дисперсии. М., 1983.

Познакомившись с принципом действия параметрического приемника, легче воспринять некоторые общие черты нелинейной акустики. Так, мы видели, что характерная особенность взаимодействия акустических волн — лавинообразное увеличение числа линий в их спектрах. Чтобы разобраться в этой сложной картине, нужно анализировать нелинейные процессы одновременно в обычном пространстве — времени, следя за искажением профиля волны (как в механике), и в пространстве частот — на «спектральном языке» (как в

Практическое применение нелинейных эффектов связано в основном с возможностью передать энергию мощных волн какой-либо одной избранной волне (например, усиливаемому сигналу). Управлять потоками энергии удается, подбирая нелинейную среду с требуемыми свойствами. Эта проблема успешно решена в оптике⁶. Найдено много кристаллов, в которых мощные световые пучки различной поляри-



Нарисованная графопостроителем ЭВМ картина искажения одного периода мощной волны накачки в присутствии сигнала с вдвое меньшей частотой (t — время в системе координат, движущейся вместе с волной со скоростью звука). Различные кривые соответствуют изменению профиля волны в ростом пройденного ею расстояния. В соседних четвертях периода профили неодинаковы, из-за чего образуются ударные волны, несимметричные относительно невозмущенного уровня.

радиофизике). Очень часто сравнительно несложному изменению профиля отвечает запутанная спектрограмма, поэтому удобно сначала определить профиль волны, а затем провести его спектральный анализ. Именно наглядность пространственно-временной картины при сравнении волн и послужила отправной точкой на пути к изложенной выше идее обработки сигнала в параметрическом приемнике.

Итак, для эффективного использования нелинейных взаимодействий в акустике необходимо либо извлекать информацию из сложных спектров (когда это возможно), либо управлять обменом энергией между различными волнами.

зации, распространяясь определенным образом относительно кристаллографических осей, могут эффективно обмениваться энергией. Так, когда одинаковые скорости имеют волны с частотами ω_n и $2\omega_n$ (скорости других гармоник при этом обязательно сильно отличаются), теоретически можно добиться полной перекачки энергии во 2-ю гармонику. (Заметим, что в акустике, где скорости всех волн с частотами $n\omega_n$ одинаковы, второй гармонике таким образом передать удастся не более 13 % энергии.) Это обстоятельство позволило создать в нелинейной оптике генераторы гармоник и другие приборы для перестройки частоты лазерного излучения.

В акустике же взаимодействуют не две—три волны, а возмущения всех допустимых частот. Поэтому нужно как-то ограничить их число, закрыв тем самым «паразитные» каналы оттока энергии.

В 60-х годах широко обсуждалась воз-

⁶ См., напр.: Ахманов С. А., Хохлов Р. В. Проблемы нелинейной оптики. М., 1964.

возможность создания систем с дисперсией звука. Представлялось, что введение резонансных элементов в среду (например, пузырьков газа в жидкость) позволит, сделав разными скорости, отделить «полезные» и «паразитные» возмущения. Добиться такой «расстройки» предполагали также, используя взаимное влияние разных типов волн, скажем, продольных и поперечных возмущений в твердом теле, или даже взаимодействие акустических колебаний с волнами иной физической природы. Однако большинство подобных идей, к сожалению, осталось на бумаге (из воплощенного отметим экспериментальные модели параметрических усилителя и генератора ультразвука с акустическим волноводом, обладающим дисперсией⁷).

Дело в том, что в нелинейной акустике на пути создания систем с дисперсией — своего рода акустических аналогов диспергирующих сред, широко используемых в оптике, — возникают трудности двух типов. Либо недоучет ряда факторов приводит к чересчур оптимистичным оценкам, либо проект оказывается технически трудно осуществим. Видимо, необходим более активный поиск как конструктивных решений уже предложенных устройств, так и принципиально новых схем, учитывающих специфику акустических взаимодействий.

Один из реальных путей повысить эффективность обмена энергией между волнами избранных частот — подавить так называемые «ключевые» волны, из-за которых энергия «перебрасывается» в высокочастотную область спектра⁸. С этой целью в обычную акустическую среду вводят избирательно поглощающие элементы (пузырьки газа, узкополосные фильтры, резонаторы и т. д.). Заметим, что для подавления таких волн не обязательно добиваться их диссипации — достаточно вывести их из числа эффективно взаимодействующих, например, за счет резонансного рассеяния на неоднородностях.

Прежде всего попробуем разобраться, как этот способ позволяет избавиться от нелинейных потерь, связанных с образованием ударных волн. Пусть в среду поступает волна накачки с частотой ω_n , а избирательно поглощается преимущественно ее 2-я гармоника с частотой $2\omega_n$. Ударные волны образуются из-за высших гар-

моник с частотами $3\omega_n$, $4\omega_n$ и т. д. Но такие гармоники в нелинейных акустических средах возникают главным образом в результате каскадных процессов с непрерывным участием 2-й гармоники. Пожалуй, наиболее понятно это выглядит на языке сопутствующих колебаниям квазичастиц — фононов. Так, фонон с частотой $3\omega_n$ образуется при слиянии фононов с частотами ω_n и $2\omega_n$, а фонон с частотой $4\omega_n$ — при слиянии двух фононов с частотами $2\omega_n$. Но если волна с частотой $2\omega_n$ интенсивно поглощается, высокие частоты в спектре тем самым «обрезаются». Впрочем, заранее не ясно, как это повлияет на волну основной частоты ω_n : станет ли она затухать слабее или же просто-напросто откроется новый канал диссипации энергии

$$\omega_n \rightarrow 2\omega_n \rightarrow \text{теплота,}$$

который заменит прежний

$$\omega_n \rightarrow 2\omega_n \rightarrow 3\omega_n, \dots,$$

связанный с передачей энергии в высокочастотную часть спектра.

Расчеты и эксперименты обнаружили удивительный, на первый взгляд, факт: введение в среду диссипативных элементов приводит к уменьшению потерь. Это позволяет увеличить размеры мощных параметрических антенн, передавать акустические колебания высокой интенсивности на большие расстояния, повысить плотность энергии, запасаемой в акустическом резонаторе.

Аналогично удастся «перебросить» значительную часть энергии накачки во 2-ю гармонику, поглощая частоты $3\omega_n$ и $4\omega_n$.

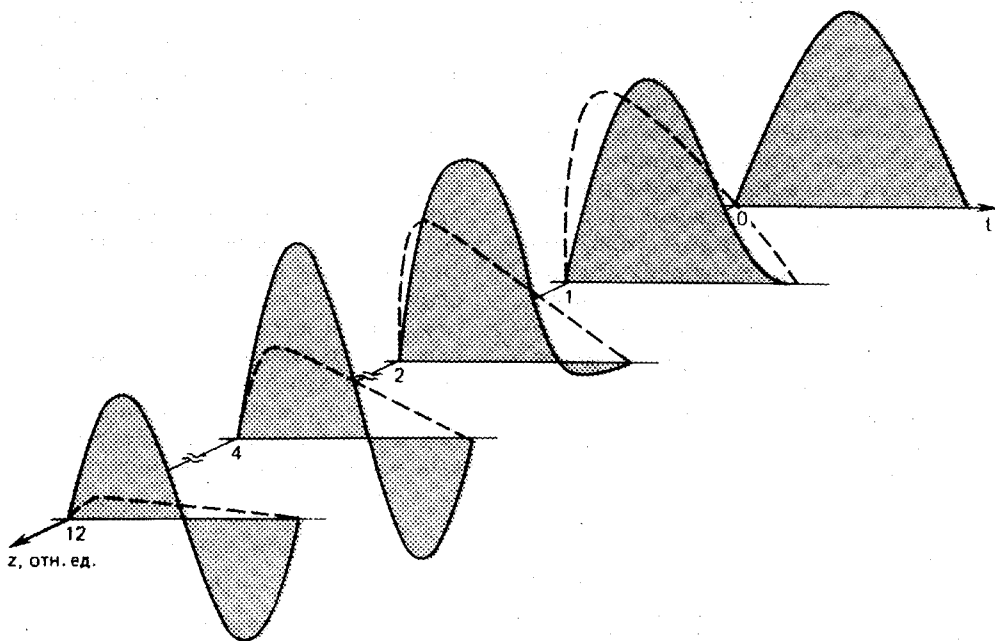
Если избирательно поглощать волны с частотами $3\omega_n/2$ и $2\omega_n$, то почти всю энергию мощной волны с частотой ω_n можно передать 1-й субгармонике с частотой $\omega_n/2$, т. е. осуществить деление частоты⁹.

Теперь постараемся ответить на общий вопрос: каковы должны быть свойства среды, чтобы волны с частотами ω_1 и ω_2 могли эффективно обмениваться энергией? Прежде всего, очевидно, необходимо, чтобы волны этой частоты в среде не поглощались. Напротив, все «паразитные» волны с частотами $2\omega_1$, $2\omega_2$, $|\omega_1 \pm \omega_2|$ и т. д. следует подавить. Таким образом, максимумы избирательного поглощения должны приходиться на эти частоты или принадле-

⁷ Островский Л. А., Папилова И. А., Сутин А. М. // Письма в ЖЭТФ. 1972. Т. 15. С. 456—458.

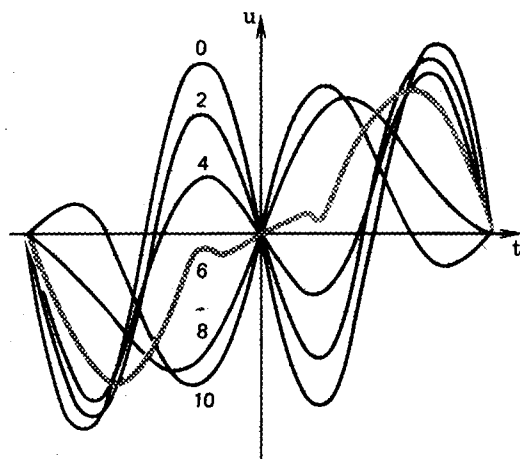
⁸ Руденко О. В. // Акустический журн. 1983. Т. 29. С. 398—402.

⁹ Андреев В. Г., Васильева О. А., Лапшин Е. А. и др. // Акустический журн. 1985. Т. 31. С. 12—16.



Эволюция при увеличении пройденного расстояния z профиля одного полупериода волны частоты ω_H в генераторе 2-й гармоники с рабочей средой, в которой избирательно поглощаются частоты $3\omega_H$ и $4\omega_H$. Штриховой кривой изображен соответствующий профиль в обычной нелинейной среде, где образуются крутые [ударные] фронты и волна затухает гораздо сильнее.

Эволюция профиля слабого сигнала с частотой $\omega_c = \omega_H/2$ в поле мощной волны накачки с частотой ω_H при параметрическом усилении в среде с избирательным поглощением волн на частотах $2\omega_H$ и $3/2\omega_H$. В результате энергия мощной волны передается слабому сигналу и обратно. По вертикальной и горизонтальной осям отложены величина сигнала u и время t , числа у кривых — расстояния z , пройденные волной [в относительных единицах]. Эффект наиболее заметен при $z = 6$ (цветная кривая), где начальный период сигнала удваивается.



жать полосе частот, перекрывающей их, но не затрагивающей исходные — ω_i и ω_j . Лишь в этом случае энергия не «растечется» по спектру.

Итак, мы обсудили возможные способы управления взаимодействием интенсивных звуковых волн. Чтобы подчеркнуть основные принципы управления и пояснить особенности взаимодействия этих волн в средах с избирательным поглощением, но без дисперсии, мы противопоставили их хорошо изученным (в оптике) взаимодействиям в средах с дисперсией, но без по-

глощения. В реальных же системах поглощение и дисперсия всегда наблюдаются одновременно, причем они связаны между собой фундаментальными соотношениями, вытекающими из принципа причинности. Поэтому реальный процесс нелинейного взаимодействия нельзя считать чисто «оптическим» или «акустическим»¹⁰. В общем

¹⁰ Подробнее об этом см.: Андреев В. Г., Сапожников О. А., Хохлова В. А. и др. // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 3. Физика. Астрономия. 1985. Т. 26. № 3. С. 58—62.

случае мы имеем дело с обратной задачей теории распространения нелинейных волн — расчетом характеристик среды, в которой данный нелинейный процесс наиболее эффективен. Конечно, поиск и техническое воплощение таких «оптимальных» сред — задача непростая.

НЕМНОГО ОБ АНАЛОГИЯХ И ПРИМЕНЕНИЯХ

Говоря о нелинейной акустике, нельзя не отметить ее тесную связь с нелинейной оптикой, имеющей дело с лазерным излучением высокой интенсивности, и нелинейной радиофизикой. В нашей стране деятельность специалистов традиционно характеризовалась обменом идеями и опытом, накопленными в этих областях. Напротив, зарубежные исследования по нелинейной акустике оказались в некоторой изоляции от общего подъема «нелинейной физики» в 60-х годах. Опираясь в основном на классическую механику и акустику, они имели и более узкую направленность.

Высокий уровень отечественных работ по физике мощного звука в значительной мере обусловлен личным вкладом Р. В. Хохлова — одного из создателей современной «нелинейной физики». В ставших классическими работах «К теории ударных радиоволн в нелинейных линиях» и «О распространении волн в нелинейных диспергирующих линиях»¹¹ он изложил общие идеи и развил математический аппарат, пригодный для описания нелинейных волновых процессов различной природы. «Проблему распространения волн в нелинейных средах, — подчеркивал он, — можно условно разделить на две части: распространение волн в условиях сильной дисперсии среды и распространение волн в условиях слабой дисперсии. В первом случае имеющиеся гармонические составляющие волны практически не взаимодействуют друг с другом или же взаимодействие осуществляется между небольшим числом составляющих с близкими по величине фазовыми скоростями. Во втором случае все гармонические составляющие сигнала резонансно взаимодействуют между собой, что создает условия для образования волны с большим содержанием гармоник»¹².

В упомянутых статьях Р. В. Хохлов рассмотрел оба варианта постановки задачи. Для первого им предложен метод укороченных уравнений, описывающих медленные изменения амплитуд взаимодействующих квазигармонических составляющих. Такие уравнения использовались впоследствии при решении многих задач нелинейной оптики и теории нелинейных диспергирующих волн.

Для сред со слабой дисперсией Р. В. Хохлов разработал метод медленно изменяющегося профиля волны и на его основе в 1961—1963 гг. создал математический аппарат нелинейной акустики. Им выведен класс новых уравнений, описывающих нелинейную эволюцию волнового поля для плоских, цилиндрических и сферических возмущений, распространяющихся в средах с разными физическими свойствами.

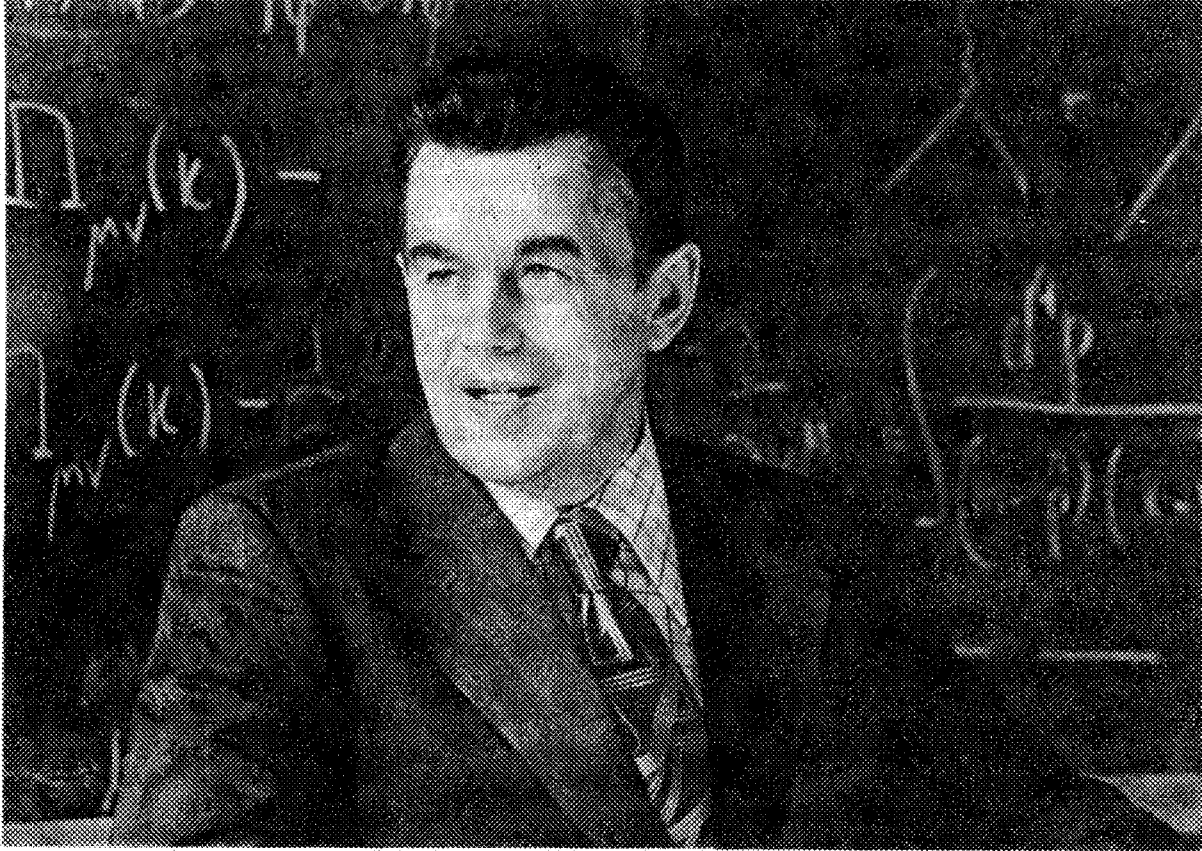
Интересно, что в своих ранних работах Р. В. Хохлов подчеркивал различия нелинейной оптики и акустики как двух полярных разделов физики нелинейных волн. Однако в последующие годы, отмеченные бурным развитием лазерной техники и нелинейной оптики, были открыты принципиально новые волновые явления — различные виды вынужденного рассеяния, самовоздействия и другие. Появилась необходимость от противопоставления перейти к поиску аналогий с целью анализа возможностей наблюдения подобных эффектов в акустике.

Так, после создания параметрических усилителей и генераторов света Р. В. Хохлов предложил ряд конкретных схем параметрических усилителей ультразвука. С его работами по вынужденному комбинационному рассеянию света связаны публикации по комбинационному акустическому взаимодействию с другими типами возмущений среды, в частности спиновыми волнами, электромагнитными волнами в пьезоэлектриках, вихревыми возбуждениями в газах и жидкостях, температурными волнами в твердом теле и сверхтекучем гелии.

Аналогия — вещь небезопасная, подчас возникает соблазн увидеть ее более глубокой, чем она есть на самом деле. Следуя идеям и технике расчетов, развитых для описания явления-прототипа, можно недооценить специфику рассматриваемого явления. В результате появляются «открытия» не существующих в природе эффектов или излишне оптимистичные оценки условий наблюдения того или иного реального процесса. В истории нелинейной акустики немало подобных примеров, связанных с неправомерной экстраполяцией аналогий. Как правило, для таких работ характерно использование чересчур простых

¹¹ Хохлов Р. В. // Радиотехника и электроника. 1961. Т. 6. С. 917—925; 1116—1127.

¹² Там же. С. 917.



РЕМ ВИКТОРОВИЧ ХОХЛОВ
[15.VII 1926 г.— 8.VIII 1977 г.]

(укороченных) уравнений. Такой подход применим в нелинейной оптике, но редко когда адекватен специфике акустических задач.

Р. В. Хохлов прекрасно владел математикой, но исходил прежде всего из физической сути явления. Показателен в этом смысле его переход от волн с бесконечным фронтом к ограниченным звуковым пучкам большой интенсивности. Этим направлением исследований Р. В. Хохлов занялся уже после того, как получил важные результаты по самофокусировке света. Через несколько лет выяснилось, что акустические взаимодействия в пучках отличаются от наблюдаемых в оптике. Обычной самофокусировки здесь нет, да и математический аппарат другой. Вместо нелинейного уравнения типа известного уравнения Шредингера, распространение мощных звуковых пучков описывается новым уравнением Хохлова—Заболотской. В 70-х годах проведены систематические исследования его решений. Это уравнение использовалось для расчетов параметрических излучателей,

причем предсказанные с его помощью эффекты неоднократно подтверждались лабораторными и натурными экспериментами.

Рассмотрим, для примера, сравнительно простой и наглядный эффект — тепловую самофокусировку звука, предсказанную Г. А. Аскарьяном в 1966 г. по аналогии с оптикой. Это явление обусловлено поглощением звука и нагреванием среды. С увеличением температуры среды изменяется ее показатель преломления и формируется своеобразная тепловая линза, фокусирующая пучок. Казалось бы, полная аналогия с самофокусировкой света. Из этого в основном и исходили авторы многих теоретических работ, посвященных «переводу» результатов нелинейной оптики на «акустический язык».

Однако между тепловым самовоздействием световых и звуковых пучков имеются и принципиальные различия. Наиболее интересно явление самофокусировки звука из-за нагревания среды при нелинейном поглощении ударных волн — у этой задачи вообще нет оптического аналога. Кроме того, нагревая жидкую среду

звук, мы передаем ей импульс, в сто тысяч раз больший, чем при поглощении равной световой энергии. Это вызывает своеобразный акустический «ветер», который дефокусирует волну и выносит теплоту из области пучка. Наконец, вблизи акустических излучателей само понятие «граница пучка» теряет смысл. Поэтому акустические измерения нужно проводить лишь в той зоне, где волна станет сферически расходящейся. Но эффект самофокусировки там уже ослаблен.

Все эти отличия выявились в экспериментах, проведенных недавно на физическом факультете МГУ¹³. В этих экспериментах пучок звуковых колебаний мощностью 60 Вт и частотой 1 МГц направлялся вертикально вниз на заполненную глицерином кювету. Сразу после включения звука формировались течения, связанные с акустическим ветром (вблизи от источника) и тепловой конвекцией (на некотором удалении от него). Акустический датчик в дальней зоне регистрировал сигнал, который через 3 мин из-за самовоздействия усиливался в 15—20 раз. Ширина пучка уменьшалась в этом месте примерно в два раза по сравнению со случаем, когда фокусировка отсутствует. Результаты этих опытов показали, что наблюдавшееся явление не укладывается в рамки теорий, развитых по аналогии с оптикой.

Не менее тесно, чем с оптикой, нелинейная акустика связана с волновыми задачами механики. Считается, что по характерным значениям возмущений — умеренные амплитуды — она занимает промежуточное место между линейной акустикой — бесконечно малые возмущения — и механикой ударных волн — сколь угодно сильные возмущения. Если сферу действия нелинейной акустики определить, исходя из применимости эволюционных уравнений Р. В. Хохлова, окажется, что для многих задач она чрезвычайно обширна и простирается вплоть до значений давления в несколько тысяч (для жидкостей) и десятков тысяч (для твердых тел) атмосфер. Затухание сильных волн, образующихся, например, при взрывах, зависит от амплитуды. В результате уменьшения давлений уже на сравнительно малых расстояниях от источника применимы представления нелинейной, а затем и линейной акустики. Влияние протяженной области со слабой нелинейностью становится заметным из-за того, что акустические нелинейные эффек-

ты накапливаются при распространении волн.

Тот факт, что ярко выраженного проявления нелинейности можно добиться при возбуждении слабого, хорошо контролируемого и воспроизводимого сигнала, позволил развить новые методы измерений, диагностики сред и абсолютной калибровки акустических датчиков.

Известно, что нагрузка на современные конструкционные материалы во многих случаях близка к предельной, определяемой их прочностью. Поэтому весьма желательно точно знать свойства материала, в частности его модули упругости. Для этого специалистами по нелинейной акустике предложены и реализованы чрезвычайно чувствительные методы измерения. Оказалось, что вместо обычно используемых мощных прессов, создающих давления до десятков тысяч атмосфер, достаточно воспользоваться простой аппаратурой, которая регистрирует накапливающийся нелинейный эффект в ультразвуковой волне с давлениями всего в десятые доли атмосферы¹⁴.

Однако разграничивать механику и акустику лишь по величине возмущения неправомерно. Существуют и более глубокие различия, — например, в подходе к задачам. Если механиков интересуют в основном интегральные характеристики волн — положение фронта, пиковые давления и т. д., то акустики рассматривают волну как сигнал сложного спектрального состава, несущий информацию об источнике и трассе распространения. Скажем, при движении интенсивной волны в атмосфере, грунте или океане она непрерывно взаимодействует с неоднородностями, которые служат рассеивателями, естественными волноводами, линзами, фильтрами, и имеют ярко выраженные частотно-избирательные свойства. Поэтому описать такую волну, не прибегая к радиофизическим методам анализа, очень трудно.

Так, спектральные методы позволяют решить многие задачи диагностики. При использовании перестраиваемого по частоте параметрического ультразвукового гидролокатора для поиска косяков рыбы удается настроиться на резонанс колебаний рыбьего пузыря и добиться увеличения эффективного радиуса обнаружения более чем в 10 раз. В последние годы значительное развитие получили резонансные методы нелинейной спектроскопии микропузырьков жидкости, в частности,

¹³ Андреев В. Г., Карабутов А. А., Сапожников О. А. и др. // Письма в ЖЭТФ. 1985. Т. 41. С. 381—384.

¹⁴ Зарембо Л. К. и др. // Акустический журн. 1973. Т. 19. С. 778—781.

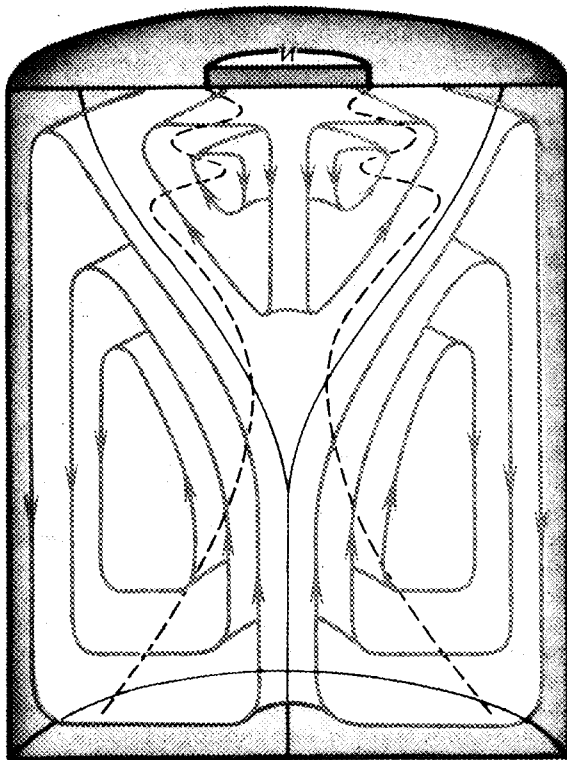
создана аппарата, позволяющая зарегистрировать даже одиночные пузырьки и определить их размеры¹⁵. Это важно для многих задач физики океана, а также для исследования крови водолазов при декомпрессии, контроля закипания теплоносителя в энергетических установках и т. д.

У нелинейной акустики давние и тесные связи с физикой твердого тела. Это направление в акустике зародилось в начале 60-х годов. О нелинейных свойствах фононов — тепловых колебаний кристалли-

ческой решетки — разумеется, знали и раньше, ведь многие важные физические свойства твердых тел: теплоемкость, теплопроводность, тепловое расширение — можно объяснить лишь с учетом этой нелинейности. Однако только после создания мощных источников ультра- и гиперзвука удалось осуществить когерентные взаимодействия волн, или взаимодействия фононов, как говорится, «в чистом виде» и появились прямые экспериментальные доказательства реальности таких взаимодействий. Много внимания в последнее время уделялось и исследованиям так называемых правил отбора, в частности, обнаружено, что некоторые запрещенные ими нелинейные процессы в твердых телах всегда имеют место¹⁶. Связано это с неоднородностью среды — разномасштабными дефектами кристаллической структуры. Этот эффект открывает новые перспективы в диагностике механических неоднородностей, позволяя, например, осуществлять динамический контроль материалов в процессе релаксации внутренних напряжений после снятия внешней нагрузки.

Обнаруженные недавно в твердых телах гигантские нелинейности резонансного характера можно использовать в акустоэлектронике для обработки информации, а также для изучения фазовых переходов в магнетиках. Работы по волнам в твердых телах, как, впрочем, и другие разделы нелинейной акустики, в свое время дали мощный толчок исследованиям более специфичных нелинейных эффектов физики твердого тела — фононного эха, обращения волнового фронта в кристаллах — и послужили основой для создания действующих приборов акустоэлектроники — устройств для преобразования радиосигналов с помощью ультра- или гиперзвука.

Нелинейная акустика твердого тела, бесспорно, заслуживает отдельной статьи, как и весьма важные для практики нелинейные методы генерации и подавления шумов, развиваемые Л. М. Лямшевым и А. В. Римским-Корсаковым с сотрудниками. Что ж, сегодня нелинейная акустика — очень обширная и многоплановая область науки, и «объять» ее всю в журнальной статье невозможно. Думается, что у «Природы» еще не раз отыщется повод обратиться к этому предмету — он того стоит.



Картина течений, формирующихся при тепловой самофокусировке звука. Мощный звуковой пучок от источника И направляется вертикально вниз на кювету цилиндрической формы, заполненную глицерином. В ближней к источнику зоне образуются потоки жидкости, вызванные «акустическим ветром» (передачей звуком заметного импульса среде), в дальней — замкнутые циркуляционные ячейки, возникающие из-за тепловой конвекции. Направления потоков показаны цветными стрелками. Акустические и конвективные потоки разделены сепаратрисой (черная сплошная линия, по форме напоминающая рамку). Штриховыми линиями качественно изображены границы пучка.

¹⁵ Кобелев Ю. А., Островский Л. А. Модели газожидкостной смеси как нелинейной диспергирующей среды // *Нелинейная акустика* / Под ред. В. А. Зверева и Л. А. Островского. Горький. 1980. С. 143—160.

¹⁶ Зарембо Л. К., Красильников В. А. // *Усп. физ. наук*. 1970. Т. 102. С. 549—586.