

И.П. Голямина

Ультразвук

Маленькая энциклопедия

**Москва
«Книга по Требованию»**

УДК 030
ББК 92
И11

И11 **И.П. Голямина**
Ультразвук: Маленькая энциклопедия / И.П. Голямина – М.: Книга по Требованию, 2013. – 400 с.

ISBN 978-5-458-42744-9

Данное издание представляет собой полное собрание материалов об ультразвуке. В книге рассказывается о различных физических явлениях, которые имеют отношение к распространению ультразвука и гиперзвука, а также с применением их в бытовой жизни, технике. Целевая аудитория - инженеры, преподаватели вузов, студенты, врачи.

ISBN 978-5-458-42744-9

© Издание на русском языке, оформление
«YOYO Media», 2013
© Издание на русском языке, оцифровка,
«Книга по Требованию», 2013

Эта книга является репринтом оригинала, который мы создали специально для Вас, используя запатентованные технологии производства репринтных книг и печати по требованию.

Сначала мы отсканировали каждую страницу оригинала этой редкой книги на профессиональном оборудовании. Затем с помощью специально разработанных программ мы произвели очистку изображения от пятен, клякс, перегибов и попытались отбелить и выровнять каждую страницу книги. К сожалению, некоторые страницы нельзя вернуть в изначальное состояние, и если их было трудно читать в оригинале, то даже при цифровой реставрации их невозможно улучшить.

Разумеется, автоматизированная программная обработка репринтных книг – не самое лучшее решение для восстановления текста в его первоизданном виде, однако, наша цель – вернуть читателю точную копию книги, которой может быть несколько веков.

Поэтому мы предупреждаем о возможных погрешностях восстановленного репринтного издания. В издании могут отсутствовать одна или несколько страниц текста, могут встретиться невыводимые пятна и кляксы, надписи на полях или подчеркивания в тексте, нечитаемые фрагменты текста или загибы страниц. Покупать или не покупать подобные издания – решать Вам, мы же делаем все возможное, чтобы редкие и ценные книги, еще недавно утраченные и несправедливо забытые, вновь стали доступными для всех читателей.

средних школ, желающим расширить и систематизировать свои представления о предмете, и, наконец, всем читателям, интересующимся прогрессом науки и техники.

Энциклопедия открывается обобщающей статьёй «Ультразвук», где рассматриваются основные особенности ультразвуковых волн и даётся обзор их применений. Эта статья служит введением к основной части книги, состоящей более чем из 250 статей, расположенных в алфавитном порядке, в которых излагаются основные закономерности, характеризующие распространение ультразвуковых волн, рассматриваются связанные с ними физические явления в веществе и освещаются области его практического использования. В статьях, непосредственно посвящённых применению ультразвуковых методов в науке, технике, медицине, упор сделан на выявление физических основ применения и на изложение принципов действия ультразвуковых приборов. Приводятся некоторые основные справочные данные, касающиеся характеристик распространения ультразвука в различных веществах, его частотных и динамических диапазонов, используемых в различных областях практического применения, а также сведения о достигаемых полезных эффектах. Вместе с тем энциклопедия не претендует на исчерпывающее изложение предмета. Основная её цель — дать читателю представление о различных аспектах ультразвуковой техники в широком смысле этого понятия с позиций современной физики и акустики.

Статьи энциклопедии можно подразделить на пять групп. Первая из них характеризует процессы и явления, свойственные колебаниям и волнам вообще и акустическим в частности; вторая описывает распространение ультразвуковых волн в веществе и их взаимодействие со средой; в третьей рассматриваются различные виды излучателей и приёмников ультразвука и физические явления, положенные в основу их действия; четвёртая группа посвящена практическому применению ультразвука — рассматриваются как отдельные конкретные применения ультразвуковых методов или конкретные приборы, так и области ультразвуковой техники в целом; к пятой группе можно отнести вспомогательные статьи, необходимые для понимания материала первых четырёх групп, в них в основном рассматриваются понятия, относящиеся к строению вещества и к физике твёрдого тела.

Каждая крупная или средняя статья представляет собой краткий рассказ на тему заголовка статьи, напечатанного жирным шрифтом, т. е. чёрного слова. Если в статье встречаются термины, которые могут быть непонятны читателю или по которым можно получить дополнительную информацию в других статьях, то названия этих статей выделены курсивом. Если термин, набранный жирным шрифтом, имеет синоним, он набирается рядом светлым шрифтом и разрядкой. С целью экономии места в энциклопедии введена система сокращений (см. ниже).

Большинство статей снабжено библиографией, в которой читатель найдёт более исчерпывающее изложение вопроса и которая содержит как монографии, так и журнальные статьи. В конце книги помещён предметный указатель.

Авторами статей являются известные учёные — акустики и ведущие специалисты в области разработки и исследований ультразвуковых методов и приборов. В создании книги принимал участие большой коллектив авторов — сотрудников Акустического института АН СССР им. акад. Н. Н. Андреева, Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова и других вузов и научно-исследовательских учреждений.

И. П. ГОЛЯМИНА.

СОКРАЩЕНИЯ, УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ И ЕДИНИЦЫ ИЗМЕРЕНИЯ

В — вольт	мс — миллисекунда	т. н. — так называемый
Вт — ватт	наз. — называется	т. о. — таким образом
гг. — годы	напр. — например	УЗ — ультразвук
ГГц — гигагерц	Н — ньютон	УЗ-вые — ультразвуковые
гл. обр. — главным образом	нек-рый — некоторый	ур-ния — уравнения
Гс — гаусс	Нп — непер	Ф-ла — формула
Гц — герц	Ом — ом	Ф-ция — функция
°С — градус температурной шкалы Цельсия	Па — паскаль	эВ — электронвольт
дБ — децибел	пр. — прочий	эдс — электродвижущая сила
Дж — джоуль	рис. — рисунок	~ — порядка величины
дин — дина	СВЧ — сверхвысокие частоты	≈ — приближённо равно
др. — другие	СГС — абсолютная система единиц (сантиметр, грамм, секунда)	λ — длина волны
К — кельвин	см. — смотри	f — циклическая частота
к-рый — который	ст. — статья	ω — круговая (угловая) частота, $\omega = 2\pi f$
Кул — кулон	табл. — таблица	c — скорость звука
кГц — килогерц	т. е. — то есть	p — звуковое давление
к.-н. — какой-нибудь	темп-ра — температура	I — интенсивность звука
к.-л. — какой-либо	Т — тесла	k — волновой вектор (k — волновое число)
коэфф. — коэффициент	т. к. — так как	e — основание натуральных логарифмов
МГц — мегагерц		
мкм — микрометр		
мс — микросекунда		

В прилагательных на «еский» опускается окончание, напр. акустич., физич. Векторные величины выделены полужирным шрифтом.

УЛЬТРАЗВУК

Ультразвук (УЗ) — упругие колебания и волны, частота к-рых превышает $(1,5-2) \cdot 10^4$ Гц (15—20 кГц). Нижняя граница области УЗ-вых частот, отделяющая её от области слышимого звука, определяется субъективными свойствами человеческого слуха и является условной, поскольку верхняя граница слухового восприятия человека имеет значительный разброс для различных индивидуумов. Верхняя граница УЗ-вых частот обусловлена физич. природой *упругих волн*, к-рые могут распространяться лишь в материальной среде, т. е. при условии, что длина волны значительно больше длины свободного пробега молекул в газах или межатомных расстояний в жидкостях и твёрдых телах. Поэтому в газах верхнюю границу частот УЗ определяют из условия приблизительного равенства длины звуковой волны и длины свободного пробега молекул; при нормальном давлении она составляет $\approx 10^9$ Гц; в жидкостях и твёрдых телах определяющим является равенство длины волны межатомным расстояниям, и граничная частота достигает $10^{12}-10^{13}$ Гц. В зависимости от длины волны и частоты УЗ обладает специфич. особенностями излучения, приёма, распространения и применения, поэтому область УЗ-вых частот удобно подразделить на три подобласти: низкие УЗ-вые частоты ($1,5 \cdot 10^4 - 10^5$ Гц), средние ($10^5 - 10^7$ Гц) и высокие ($10^7 - 10^9$ Гц). Упругие волны с частотами $10^9 - 10^{13}$ Гц принято называть *гиперзвуком*.

УЗ-вые волны применяются как в научных исследованиях для изучения строения и свойств вещества, так и для решения самых разнообразных технич. задач. В связи с этим термин «ультразвук», или «ультразвуковая техника», часто используют для обозначения области науки и техники, занимающейся изучением и практич. применениями акустич. волн и не имеющей целью непосредственное восприятие звуковой информации слуховой системой человека (соответствующий термин в зарубежной научно-технич. литературе — *ultrasonics*). В таком понимании УЗ его частотный диапазон не ограничивается снизу строго частотой 15—20 кГц, а может захватывать и часть слышимого диапазона частот. УЗ как область науки и техники является одним из разделов современной акустики.

Ультразвук как упругие волны. УЗ-вые волны (неслышимый звук) по своей природе не отличаются от упругих волн слышимого диапазона, а также от инфразвуковых волн. В газах и жидкостях распространяются только продольные волны, а в твёрдых телах — продольные и сдвиговые.

Распространение ультразвука подчиняется основным законам, общим для акустических волн любого диапазона частот, обобщённо называемых обычно звуковыми волнами, и описывается в первом приближении волновым уравнением, общим для всех частот (см. *Волны*). К основным законам распространения относятся законы *отражения звука* и *преломления звука* на границах различных сред, *дифракции звука* и *рассеяния звука* при наличии препятствий и неоднородностей в среде и неровностей на границах, законы волноводного распространения в ограниченных участках среды (см. *Нормальные волны*). Существенную роль при этом играет соотношение между длиной волны звука λ и характерным для условий его распространения геометрич. размером D — размером источника звука или препятствия на пути волны, размером неоднородностей среды, поперечного сечения волновода и т. п. При $D \gg \lambda$ распространение звука вблизи препятствий происходит в основном по законам геометрич. акусти-

ки, т. е. для описания звукового поля можно пользоваться законами отражения и преломления. Степень отклонения от геометрич. картины распространения и необходимость учёта дифракционных явлений определяются параметром $P = \sqrt{\lambda c}/D$, где r — расстояние от точки наблюдения до объекта, вызывающего дифракцию.

Скорость распространения УЗ-вых волн в неограниченной среде определяется характеристиками упругости и плотностью среды (см. *Скорость звука*). В ограниченных средах на скорость распространения волн влияет наличие и характер границ, что приводит к частотной зависимости скорости, т. е. к *дисперсии скорости звука*. Уменьшение амплитуды и интенсивности УЗ-вой волны по мере её распространения в заданном направлении, т. е. *затухание звука*, обуславливается, как и для волн любой частоты, расхождением фронта волны с удалением от источника (см. *Звуковое поле*), рассеянием и *поглощением звука*, т. е. переходом звуковой энергии в другие формы, и в первую очередь в тепловую. На всех частотах как слышимого, так и неслышимых диапазонов имеет место т. н. классическое поглощение, обусловленное сдвиговой вязкостью (внутренним трением) и теплопроводностью среды. Кроме того, почти во всех средах существует дополнительное (релаксационное) поглощение, обусловленное различными релаксационными процессами в веществе (см. *Релаксация*) и часто существенно превосходящее «классическое» поглощение. Относительная роль того или иного фактора при затухании звука зависит как от свойств среды, в которой звук распространяется, так и от характеристик самой волны, и в первую очередь от её частоты.

При значительном возрастании интенсивности звуковых волн в их поле заметнее проявляются различные *нелинейные эффекты*: нарушается принцип суперпозиции и возникает взаимодействие волн, приводящее к появлению комбинационных тонов; изменяется форма волны, спектр её обогащается высшими гармониками и соответственно растёт поглощение; становятся заметными постоянные силы (см. *Давление звукового излучения*) и постоянные потоки вещества (см. *Акустические течения*); при достижении некоего порогового значения интенсивности УЗ в жидкости возникает *кавитация*. Для математич. описания волн большой интенсивности приближения линейной акустики уже недостаточны, в ур-ниях звукового поля необходим учёт членов высшего порядка. Критерием применимости аппарата линейной акустики и возможности пренебрежения нелинейными эффектами является для плоских волн малость акустич. *Маха числа*: $M \ll 1$, где $M = v/c$, v — колебательная скорость частиц в волне, c — скорость её распространения.

Специфические особенности ультразвука. Хотя физич. природа УЗ и управляющие его распространением основные законы те же, что и для звуковых волн любого диапазона частот, он обладает рядом специфич. особенностей, к-рые определяют его большое значение как в науке, так и в технике. Эти особенности обусловлены относительно высокими его частотами и соответственно малостью длин волн. Так, для высоких УЗ-вых частот длины волн в воздухе составляют $3,4 \cdot 10^{-3} — 3,4 \cdot 10^{-5}$ см, в воде $1,5 \cdot 10^{-2} — 1,5 \cdot 10^{-4}$ см и в стали $5 \cdot 10^{-2} — 5 \cdot 10^{-4}$ см; для самой низкочастотной области УЗ длины волн не превышают в большинстве случаев нескольких см и лишь вблизи нижней границы диапазона достигают в твёрдых телах нескольких десятков см.

Малость длины волны обуславливает лучевой характер распространения УЗ-вых волн. Даже при относительно небольшой величине характерного размера D параметр P для среднего и высокочастотного диапазонов УЗ невелик, из чего следует, что вблизи излучателя УЗ-вые волны распространяются в виде пучков, поперечный размер к-рых сохраняется близким к размеру излучателя. Попадая на крупные препятствия или неоднородности в среде, такой пучок (УЗ-вой луч) испытывает регулярное отражение и преломление. При попадании УЗ-вого луча на малые препятствия или дефекты возникает рассеянная волна, что позволяет обнаруживать в среде весьма малые неоднородности, порядка десятых и сотых долей мм. Отражение и рассеяние УЗ на неоднородностях среды позволяют **формировать** в оптически непрозрачных средах звуковые изображения **предметов**, используя звуковые фокусирующие системы (см. *Фокусировка звука*) подобно тому, как это делается с помощью световых лучей. Сам процесс фо-

кусирования УЗ-вых волн посредством акустич. линз, рефлекторов и с помощью излучателей вогнутой формы возможен лишь благодаря малости длины волны в сравнении с размерами этих устройств. Фокусировка УЗ позволяет не только получать звуковые изображения, напр. в системах звуковидения и акустич. голографии, но и концентрировать звуковую энергию, получая в среде высокие значения *интенсивности звука*, к-рых на поверхности обычных излучателей ультразвука достичь невозможно. С помощью УЗ-вых фокусирующих систем можно формировать заданные характеристики *направленности* излучателей и управлять ими.

Периодич. изменение показателя преломления световых волн, связанное с изменением плотности в УЗ-вой волне, вызывает *дифракцию света на ультразвуке*, наблюдаемую на частотах УЗ мегагерцевого — гигагерцевого диапазона. УЗ-вую волну при этом можно рассматривать как дифракционную решётку, период к-рой определяется длиной звуковой волны.

Поскольку УЗ-вые волны характеризуются малыми периодами колебаний (в диапазоне средних УЗ-вых частот период имеет порядок микросекунд), они могут излучаться в виде коротких *импульсов акустических*, к-рые позволяют осуществлять достаточно тонкую временную селекцию распространяющихся в среде акустич. сигналов.

УЗ-вые волны затухают значительно быстрее, чем волны более низкочастотного диапазона, т. к. коэфф. «классического» поглощения звука (на единицу расстояния) пропорционален квадрату частоты. В низкочастотной области коэфф. релаксационного поглощения также растёт пропорционально квадрату частоты, однако при повышении частоты этот рост замедляется и коэфф. поглощения стремится к постоянной величине. Область, где наблюдается такое изменение хода коэфф. поглощения, наз. релаксационной, а средняя её частота — частотой релаксации. Величина, обратная частоте релаксации, — время релаксации — характеризует процесс перераспределения энергии внутри вещества. Помимо характерного хода коэфф. поглощения УЗ, в релаксационной области наблюдается рост скорости звука с частотой — дисперсия, обусловленная физич. процессами в веществе и отличающаяся от дисперсии скорости звука, характерной для любых частот и связанной с геометрич. условиями распространения волны. Дисперсия УЗ в релаксационных областях обычно не превышает нескольких процентов. В многоатомных газах релаксация связана с обменом энергии между поступательными и внутренними степенями свободы, и характерные частоты лежат в среднем и даже низкочастотном диапазонах. В жидкостях к основным релаксационным процессам относятся, напр., внутримолекулярные превращения, структурная и химич. релаксации; соответствующие частоты лежат чаще всего в области частот 10^6 — 10^7 Гц. В твёрдых телах имеются релаксационные процессы различной природы, обусловленные, напр., *взаимодействием ультразвука с электронами проводимости*, со спиновой системой (см. *Спин-фононное взаимодействие*), с колебаниями кристаллической решётки. Влияние этих процессов проявляется в частотной зависимости поглощения УЗ. Резонансные явления типа *акустического парамагнитного резонанса* (область частот 10^9 — 10^{11} Гц) и *акустического ядерного магнитного резонанса* (10^6 — 10^8 Гц) дают соответствующие пики поглощения. Резонансный характер может иметь также и *дислокационное поглощение* в кристаллах. Все эти особенности поглощения УЗ в твёрдых телах обусловлены взаимодействием УЗ-вых и гиперзвуковых волн с внутренними возбуждениями в твёрдых телах. Возникновение же такого взаимодействия связано с тем, что средние и высокие УЗ-вые частоты становятся сравнимы с характерными частотами процессов в веществе на молекулярном и атомном уровне, а длины волн сравнимы с параметрами внутренней структуры вещества. Последнее обстоятельство объясняет также увеличение рассеяния упругих волн на УЗ-вых частотах, наблюдаемое в микронеоднородных средах, в поликристаллич. телах: сечение рассеяния на неоднородностях возрастает, если их размеры становятся порядка длины волны. Связь характера распространения УЗ и, в частности, его высокочастотной области — гиперзвука — со структурой вещества и элементарными возбуждениями в нём является одной из важнейших особенностей УЗ-вых волн. Она позволяет судить о строении вещества на основании измерений скорости и погло-

щения УЗ в нём в зависимости от частоты, а также от нек-рых внешних факторов — темп-ры, давления и др.

Особенностью УЗ в высокочастотном и гиперзвуковом диапазонах является возможность применения к нему представлений и методов квантовой механики, поскольку длины волн и частоты в этих диапазонах становятся одного порядка с параметрами и частотами, характеризующими структуру вещества. Упругой волне данной частоты при этом сопоставляется квазичастица — *фонон*, или квант звуковой энергии. Квантово-механич. представления удобны при рассмотрении различных взаимодействий в твёрдых телах. Напр., рассеяние и поглощение звука колебаниями кристаллич. решётки можно рассматривать как взаимодействие когерентных и тепловых фононов, комбинационное рассеяние света (см. *Мандельштама — Бриллюэна рассеяние*) — как взаимодействие фотонов с фононами, а взаимодействие с электронами проводимости в металлах и полупроводниках и со спинами и спиновыми волнами в магнитоупорядоченных кристаллах (см. *Магнитоупругие волны*) — соответственно как электрон-фононное, спин-фононное и магнито-фононное взаимодействия.

Ещё одна весьма важная особенность УЗ — возможность получения высоких значений интенсивности при относительно небольших амплитудах колебательного смещения, т. к. при данной амплитуде интенсивность прямо пропорциональна квадрату частоты. (Амплитуда колебательного смещения ξ на практике лимитируется прочностью акустич. излучателей.) Существенно возрастает с частотой и роль нелинейных эффектов в звуковом поле, поскольку при заданном значении ξ амплитуда колебательной скорости v и, следовательно, акустич. число Маха M растут с частотой f : для гармонич. волн $v = 2\pi f\xi$. В УЗ-вом поле большой интенсивности развиваются значительные акустич. течения, скорость к-рых, как правило, мала в сравнении с колебательной скоростью частиц. Течения могут быть обусловлены поглощением звука, могут возникать в стоячих волнах или в пограничном слое вблизи препятствий различного вида. Радиационное давление также возрастает с увеличением частоты, т. к. величина его пропорциональна интенсивности звука; в УЗ-вом диапазоне частот оно используется в практике акустич. измерений для определения интенсивности звука. *Пондеромоторные силы* как акустич., так и гидродинамич. происхождения, действующие на находящиеся в звуковом поле тела, приобретают в УЗ-вом диапазоне частот заметную величину, поскольку они пропорциональны либо квадрату колебательной скорости, либо колебательной скорости в первой степени, как, напр., в случае *звукового давления*. Для того чтобы определяющие разнообразные эффекты звукового поля параметры — интенсивность звука, звуковое давление, колебательная скорость, радиационное давление — достигли заметной величины, с увеличением частоты требуется всё меньшее значение амплитуды колебательного смещения (см. табл. 1).

Важнейшим нелинейным эффектом в УЗ-вом поле является кавитация — возникновение в жидкости массы пульсирующих пузырьков, заполненных паром, газом или их смесью. Сложное движение пузырьков, их захлопывание, слияние друг с другом и т. д. порождают в жидкости импульсы сжатия (микроударные волны) и микропотоки, вызывают локальное нагревание среды, ионизацию. Эти эффекты оказывают влияние на вещество: происходит разрушение находящихся в жидкости твёрдых тел (*кавитационная эрозия*), возникает перемешивание жидкости, инициируются или ускоряются различные физич. и химич. процессы. Изменяя условия протекания кавитации, можно усиливать или ослаблять различные кавитационные эффекты, напр. с ростом частоты УЗ увеличивается роль микропотоков и уменьшается кавитационная эрозия, с увеличением гидростатич. давления в жидкости возрастает роль микроударных воздействий. Увеличение частоты обычно приводит к повышению порогового значения интенсивности, отвечающего началу кавитации, к-рое зависит от рода жидкости, её газосодержания, темп-ры и пр. Для воды в низкочастотном УЗ-вом диапазоне при атмосферном давлении оно обычно составляет 0,3—1 Вт/см².

Источники и приёмники ультразвука. В природе УЗ встречается как в качестве компоненты многих естественных шумов (в шуме ветра, водопада, дождя, в шуме гальки, перекатываемой морским прибоем, в звуках, сопровождающих

Табл. 1. — Основные характеристики ультразвука различной интенсивности

Интенсивность звука, Вт/см ²	Амплитуда звукового давления, дин/см ²	Амплитуда колебательной скорости, см/с	Амплитуда относительной плотности*	Радиационное давление, дин/см ²	Амплитуда колебательного смещения в см на частоте:				
					20 кГц	100 кГц	1 МГц	10 МГц	100 МГц
10 ⁻¹⁰	0,3	6,8 · 10 ⁻³	2 · 10 ⁻⁷	3 · 10 ⁻⁸	Воздух				
10 ⁻⁵	90	2,1	6 · 10 ⁻⁵	3 · 10 ⁻³	5,5 · 10 ⁻⁸	1,1 · 10 ⁻⁸	1,1 · 10 ⁻⁹	1,1 · 10 ⁻¹⁰	1,1 · 10 ⁻¹¹
1	3 · 10 ⁴	6,8 · 10 ²	2 · 10 ⁻²	3 · 10 ²	1,8 · 10 ⁻⁵	3,6 · 10 ⁻⁶	3,6 · 10 ⁻⁷	3,6 · 10 ⁻⁸	3,6 · 10 ⁻⁹
					5,5 · 10 ⁻³	1,1 · 10 ⁻³	1,1 · 10 ⁻⁴	1,1 · 10 ⁻⁵	1,1 · 10 ⁻⁶
10 ⁻⁵	5,5 · 10 ³	3,7 · 10 ⁻²	2,5 · 10 ⁻⁷	7 · 10 ⁻⁴	Вода				
1	1,7 · 10 ⁶	10	7 · 10 ⁻⁵	70	3 · 10 ⁻⁷	6 · 10 ⁻⁸	6 · 10 ⁻⁹	6 · 10 ⁻¹⁰	6 · 10 ⁻¹¹
10 ²	1,7 · 10 ⁷	10 ²	7 · 10 ⁻⁴	7 · 10 ³	8 · 10 ⁻⁶	1,6 · 10 ⁻⁶	1,6 · 10 ⁻⁶	1,6 · 10 ⁻⁷	1,6 · 10 ⁻⁷
					8 · 10 ⁻⁴	1,6 · 10 ⁻⁴	1,6 · 10 ⁻⁵	1,6 · 10 ⁻⁶	1,6 · 10 ⁻⁷
10 ⁻⁵	3 · 10 ⁴	6 · 10 ⁻³	10 ⁻⁸	1,7 · 10 ⁻⁴	Сталь (продольные волны)				
1	10 ⁷	2	3,3 · 10 ⁻⁶	17	5 · 10 ⁻⁸	10 ⁻⁸	10 ⁻⁹	10 ⁻¹⁰	10 ⁻¹¹
10 ²	10 ⁸	20	3,3 · 10 ⁻⁶	1,7 · 10 ⁻³	1,6 · 10 ⁻⁶	3 · 10 ⁻⁶	3 · 10 ⁻⁷	3 · 10 ⁻⁸	3 · 10 ⁻⁹

* Амплитуда изменения плотности, отнесённая к плотности невозмущённой среды.

грозовые разряды, и т. д.), так и среди звуков животного мира. Некоторые животные пользуются УЗ-выми волнами для обнаружения препятствий, ориентировки в пространстве (см. *Локация*). К ним относятся: летучие мыши, ведущие ночной образ жизни и вынужденные ориентироваться в темноте; дельфины и некоторые виды китов, т. е. морские животные, обитающие в среде, где звуковые волны являются единственным видом распространяющихся волн; некоторые виды птиц, обитающих в тёмных пещерах, и грызунов, живущих под землёй. Способностью к испусканию и восприятию УЗ-вых волн обладают некоторые насекомые (сверчки, цикады, отдельные виды бабочек). Как правило, животные пользуются для локации частотами от десятков до сотен кГц. Некоторые млекопитающие, напр. собаки, кошки, также обладают способностью восприятия УЗ с частотой до сотни кГц.

Излучатели ультразвука, используемые при изучении УЗ-вых волн и при их технич. применениях, можно подразделить на две большие группы. К первой относятся излучатели-генераторы; колебания в них возбуждаются из-за наличия препятствий на пути постоянного потока — струи газа или жидкости. Вторая группа излучателей — *электроакустические преобразователи*; они преобразуют уже заданные колебания электрич. напряжения или тока в механич. колебания к.-л. твёрдого тела, к-рое и излучает в окружающую среду акустич. волны.

В излучателях первого типа (механических) преобразование кинетич. энергии струи в акустическую возникает в результате периодич. прерывания струи (см. *Сирены*), при натекании её на препятствия различного вида (см. *Газоструйные излучатели, Свистки*). В последнем случае для усиления отдельных частотных компонент излучения применяют резонансные элементы конструкции. Жидкостные механич. излучатели УЗ часто основываются на возбуждении колебаний твёрдой излучающей системы при натекании на неё струи (см. *Гидродинамический излучатель*). Гидродинамич. излучатели в жидкости дают относительно дешёвую УЗ-вую энергию на частотах до

30—40 кГц при интенсивности в непосредственной близости от излучателя до нескольких Вт/см². Механич. излучатели используются в низкочастотном диапазоне УЗ и в диапазоне звуковых частот. Они относительно просты по конструкции и в эксплуатации, и их изготовление недорого, но они не могут создавать монохроматич. излучение и тем более излучать звуковые сигналы строго заданной формы: спектр их сложен и определяется конструкцией излучателя и режимом работы. Такие излучатели отличаются нестабильностью частоты и амплитуды, однако при излучении в газовые среды они обладают достаточной эффективностью и мощностью излучения; их КПД составляет от нескольких % до 50%, а интенсивность достигает вблизи излучателя нескольких Вт/см²; общая мощность излучения меняется в пределах от нескольких Вт до десятков кВт.

Излучатели второго типа основываются на различных физич. эффектах электромеханич. преобразования. Как правило, они линейны, т. е. воспроизводят по форме возбуждающий электрич. сигнал. Большинство излучателей УЗ предназначено для работы на к.-л. одной частоте, поэтому в устройстве излучающих преобразователей обычно используются резонансные колебания механич. системы, что позволяет существенно повысить их эффективность. Преобразователи без излучающей механич. системы, напр. основанные на электрич. разряде в жидкости, применяются редко. В низкочастотном УЗ-вом диапазоне применяются *электродинамические излучатели* и излучающие *магнитострикционные преобразователи* и *пьезоэлектрические преобразователи*. Электродинамич. излучатели используются на самых низких ультразвуковых частотах, а также в диапазоне слышимых частот. Наиболее широкое распространение в низкочастотном диапазоне УЗ получили излучатели магнитострикционного и пьезоэлектрич. типов. Основу магнитострикционных преобразователей составляет сердечник из магнитострикционного материала (никеля, специальных сплавов или ферритов) в форме стержня или кольца. Пьезоэлектрич. излучатели для этого диапазона частот имеют обычно составную стержневую конструкцию в виде пластины из *пьезокерамики* или пьезоэлектрич. кристалла, зажатой между двумя металлич. блоками. В магнитострикционных и пьезоэлектрич. преобразователях, рассчитанных на звуковые частоты, используются изгибные колебания пластин и стержней или радиальные колебания колец. В среднечастотном диапазоне УЗ применяются почти исключительно пьезоэлектрич. излучатели в виде пластин из пьезокерамики или кристаллов *пьезоэлектриков* (кварца, дигидрофосфата калия, ниобата лития и др.), совершающих продольные или сдвиговые резонансные колебания по толщине. КПД пьезоэлектрич. и магнитострикционных преобразователей при излучении в жидкость и твёрдое тело в низкочастотном и среднечастотном диапазонах составляет 50—90%. Интенсивность излучения может достигать нескольких Вт/см² у серийных пьезоэлектрич. излучателей и нескольких десятков Вт/см² у магнитострикционных излучателей; она ограничивается прочностью и нелинейными свойствами материала излучателей. Для увеличения интенсивности и амплитуды колебаний используют УЗ-вые *концентраторы*. В диапазоне средних УЗ-вых частот концентратор представляет собой фокусирующую систему, чаще всего в виде пьезоэлектрич. преобразователя вогнутой формы, излучающего сходящуюся сферич. или цилиндрич. волну. В фокусе подобных концентраторов достигается интенсивность 10^5 — 10^6 Вт/см² на частотах порядка МГц. В низкочастотном диапазоне используются концентраторы — трансформаторы колебательной скорости в виде резонансных стержней переменного сечения, позволяющие получать амплитуды смещения до 50—80 мкм.

В качестве приёмников ультразвука на низких и средних частотах чаще всего применяют электроакустич. преобразователи, обычно пьезоэлектрич. типа. Такие приёмники позволяют воспроизводить форму акустич. сигнала, т. е. временную зависимость звукового давления, колебательной скорости, смещения. В зависимости от условий применения приёмники делают либо резонансными, либо широкополосными. При этом желательно, чтобы они **искажали** звуковое поле в минимальной степени, т. е. чтобы размеры их **были меньше** длины волны. Для получения усреднённых по времени характеристик **звукового поля** пользуются *термическими приёмниками* звука в виде **покрытых звукопоглощающим веществом** термопар или термисторов, измери-