

¹Эргашев Асқар Жонгобоевич

²Хамроев Жавохир Толмас ўгли

¹Самаркандский Государственный Медицинский Университет

**²108 студентов педиатрического факультета Самаркандского государственного
медицинского университета**

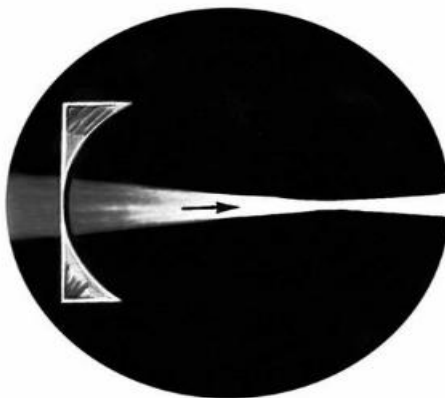
АКУСТИЧЕСКОЕ ТЕЧЕНИЕ И КАВИТАЦИЯ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ВОЛН В ЖИДКОСТЯХ

Аннотация: По своей физической природе ультразвук представляет собой упругие волны и в этом он не отличается от звука. Частотная граница между звуковыми и ультразвуковыми волнами поэтому условна; она определяется субъективными свойствами человеческого слуха и соответствует усреднённой верхней границе слышимого звука. Однако благодаря более высоким частотам и, следовательно, малым длинам волн имеет место ряд особенностей распространения. Совокупность уплотнений и разрежений, сопровождающая распространение ультразвуковой волны, представляет собой своеобразную решётку, дифракцию световых волн на которой можно наблюдать в оптически прозрачных телах. Малая длина ультразвуковых волн является основой для того, чтобы рассматривать их распространение в ряде случаев методами геометрической акустики.

Ключевые слова: Ультразвук, упругие волны, затухание, молекулярная акустика, релаксация, уплотнения, разрежений, фокусировка звука, скорость, частота, нелинейной акустики, кавитация, свистки и сирены, фаноны, квазичастицы.

Актуальность: Ультразвук- это упругие колебания и волны с частотами приблизительно от 20 кГц и до 1 ГГц (10^9 Гц). Область частот от 10^9 до 10^{12-13} Гц принято называть гиперзвуком. Область частот ультразвука можно подразделить на три подобласти. Ультразвук низких частот ($1,5 \cdot 10^4$ — 10^5) Гц — УНЧ, Ультразвук средних частот (10^5 — 10^7) Гц — УСЧ и область высоких частот (10^7 — 10^9) Гц — УЗВЧ. Каждая из этих подобластей характеризуется своими специфическими особенностями генерации, приёма, распространения и применения. Физические свойства и особенности распространения ультразвука: по своей физической природе ультразвук представляет собой упругие волны и в этом он не отличается от звука. Частотная граница между звуковыми и ультразвуковыми волнами поэтому условна; она определяется субъективными свойствами человеческого слуха и соответствует усреднённой верхней границе слышимого звука. Однако благодаря более высоким частотам и, следовательно, малым длинам волн имеет место ряд особенностей распространения ультразвука. Так, для УЗВЧ 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. ультразвук в газах и, в частности, в воздухе распространяется с большим затуханием. Жидкости и твёрдые тела (в особенности монокристаллы) представляют собой, как правило, хорошие проводники ультразвука, затухание в которых значительно меньше. Так, например, в воде затухание ультразвука при прочих равных условиях приблизительно в **1000 раз меньше, чем в воздухе**. Поэтому области использования УСЧ и УЗВЧ относятся почти исключительно к жидкостям и твёрдым телам, а в воздухе и газах применяют только УНЧ. Ввиду малой длины волны ультразвука на характере его распространения сказывается молекулярная структура среды, поэтому, измеряя скорость ультразвука ϑ и коэффициент поглощения α , можно судить о молекулярных свойствах вещества. Этими вопросами занимается молекулярная акустика. Характерная особенность распространения ультразвука

в газах и жидкостях — существование отчётливо выраженных областей дисперсии, сопровождающейся резким возрастанием его поглощения. Коэффициент поглощения ультразвука в ряде жидкостей существенно превосходит рассчитанный по классической теории и не обнаруживает предсказанного этой теорией увеличения, пропорционального квадрату частоты. Все эти эффекты находят объяснение в релаксационной теории, которая описывает распространение ультразвука в любых средах и является теоретической базой современной молекулярной акустики, а основной экспериментальный метод — измерение зависимости скорости распространения и особенно ρ (плотность) от частоты и от внешних условий (температуры, давления и др.). Совокупность уплотнений и разрежений, сопровождающая распространение ультразвуковой волны, представляет собой своеобразную решётку, дифракцию световых волн на которой можно наблюдать в оптически прозрачных телах. Малая длина ультразвуковых волн является основой для того, чтобы рассматривать их распространение в ряде случаев методами геометрической акустики. Физически это приводит к лучевой картине распространения. Отсюда вытекают такие свойства ультразвука, как возможность геометрического отражения и преломления, а также фокусировки звука (**рис. 1**).



(рис.1)

Следующая важная особенность ультразвука, — возможность получения большой интенсивности даже при сравнительно небольших амплитудах колебаний, так как при данной амплитуде плотность потока энергии пропорциональна квадрату частоты. Ультразвуковые волны большой интенсивности сопровождаются рядом эффектов, которые могут быть описаны лишь законами нелинейной акустики. Так, распространению ультразвуковых волн в газах и в жидкостях сопутствует движение среды, которое называют акустическим течением (**рис. 2**). Скорость акустического течения зависит от вязкости среды, интенсивности ультразвука и его частоты; вообще говоря, она мала и составляет доли % от скорости ультразвука.



(рис.2)

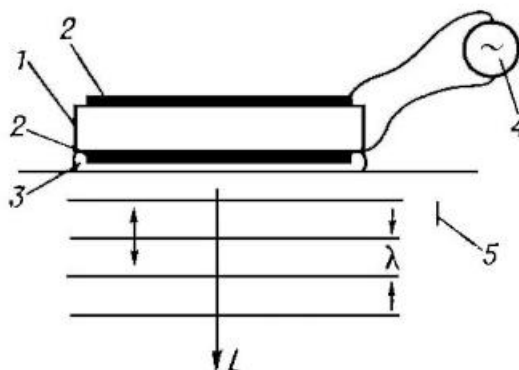
К числу важных нелинейных явлений, возникающих при распространении интенсивного ультразвука в жидкостях, относится акустическая кавитация — рост в ультразвуковом поле пузырьков из имеющихся субмикроскопических зародышей газа или пара в жидкостях до размеров в доли мм, которые начинают пульсировать с частотой ультразвука и захлопываются в положительной фазе давления. При захлопывании пузырьков газа возникают большие локальные давления порядка тысяч атмосфер, образуются сферические ударные волны. Возле пульсирующих пузырьков образуются акустические микропотоки. Явления в кавитационном поле приводят к ряду как полезных (получение эмульсий, очистка загрязнённых деталей и др.), так и вредных (эрозия излучателей ультразвука) явлений. Частоты ультразвука, при которых используется ультразвуковая кавитация в технологических целях, лежат в области УНЧ. Интенсивность, соответствующая порогу кавитации, зависит от рода жидкости, частоты звука, температуры и других факторов. В воде на частоте 20 кГц она составляет около 0,3 Вт/см². На частотах диапазона УСЧ в ультразвуковом поле с интенсивностью от нескольких Вт/см² может возникнуть фонтанирование жидкости (рис. 3) и распыление её с образованием весьма мелкодисперсного тумана.



(рис.3)

Генерация ультразвука: Для генерирования ультразвуковых колебаний применяют разнообразные устройства, которые могут быть разбиты на 2 основные группы — механические, в которых источником ультразвука является механическая энергия потока газа или жидкости, и электромеханические, в которых ультразвуковая энергия получается преобразованием электрической. Механические излучатели ультразвука — воздушные и жидкостные свистки и сирены — отличаются сравнительной простотой устройства и эксплуатации, не требуют дорогостоящей электрической энергии высокой частоты, КПД их составляет 10—20%. Основным недостатком всех механических ультразвуковых излучателей — сравнительно широкий спектр излучаемых частот и нестабильность частоты и амплитуды, что не позволяет их использовать для контрольно-измерительных целей; они применяются главным образом в промышленной ультразвуковой технологии и частично — как средства сигнализации. Основным методом излучения ультразвука — преобразование тем или иным способом электрических колебаний в колебания механические. В диапазоне УНЧ возможно применение электродинамических и электростатических излучателей. Широкое применение в этом диапазоне частот нашли излучатели ультразвука, использующие магнестрикционный эффект в никеле и в ряде специальных сплавов, также в ферритах. Для излучения УСЧ и УЗВЧ используется главным образом явление пьезоэлектричества. Основными пьезоэлектрическими материалами для излучателей ультразвука служат

пьезокварц, ниобат лития, дигидрофосфат калия, а в диапазоне УНЧ и УСЧ — главным образом различные пьезокерамические материалы. Магнитострикционные излучатели представляют собой сердечник стержневой или кольцевой формы с обмоткой, по которой протекает переменный ток, а пьезоэлектрические — пластинку (рис. 4) или стержень из пьезоэлектрического материала с металлическими электродами, к которым прикладывается переменное электрическое напряжение. В диапазоне УНЧ широкое распространение получили составные пьезоизлучатели, в которых пьезокерамическая пластинка зажимается между металлическими блоками. Как правило, для увеличения амплитуды колебаний и излучаемой в среду мощности применяются колебания магнитострикционных и пьезоэлектрических элементов на их собственной резонансной частоте.



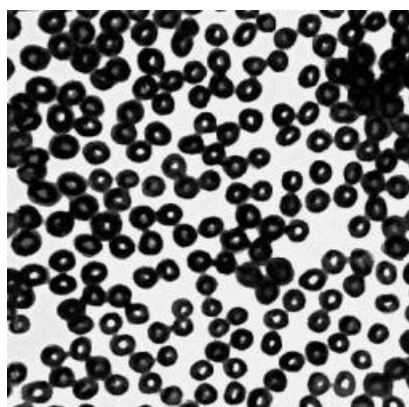
(рис.4)

Предельная интенсивность излучения ультразвука определяется прочностными и нелинейными свойствами материала излучателей, а также особенностями использования излучателей. Диапазон интенсивности при генерации ультразвука в области УСЧ чрезвычайно широк: интенсивности от $(10^{-14}—10^{-15})$ Вт/см² до 0,1 Вт /см² считаются малыми. Для многих целей необходимо получить гораздо большие интенсивности, чем те, которые могут быть получены с поверхности излучателя. В этих случаях можно воспользоваться фокусировкой ультразвука. Так, в фокусе параболоида, внутренние стенки которого выполнены из мозаики кварцевых пластинок или из пьезокерамики титанита бария, на частоте 0,5 МГц удаётся получать в воде интенсивности ультразвука, большие, чем 10^5 Вт/см². Для увеличения амплитуды колебаний твёрдых тел в диапазоне УНЧ часто пользуются стержневыми ультразвуковыми концентраторами, позволяющими получать амплитуды смещения до 10^{-4} см. Выбор метода генерации ультразвука зависит от области частот ультразвука, характера среды (газ, жидкость, твёрдое тело), типа упругих волн и необходимой интенсивности излучения.

Приём и обнаружение ультразвука: Вследствие обратимости пьезоэффекта он широко применяется и для приёма ультразвука. Изучение ультразвукового поля может производиться и оптическими методами: ультразвук распространяясь в какой-либо среде, вызывает изменение её оптического показателя преломления, благодаря чему его можно визуализировать, если среда прозрачна для света. Смежная область акустики и оптики (акустооптика) получила большое развитие, в особенности после появления газовых лазеров непрерывного действия; развились исследования по дифракции света на ультразвука и её различным применениям.

Применения ультразвука. Применения ультразвука чрезвычайно разнообразны. Ультразвук служит мощным методом исследования различных явлений во многих областях физики. Так, например, ультразвуковые методы применяются в физике твёрдого тела и физике полупроводников; возникла целая новая область физики — акусто-электроника, на основе достижений которой разрабатываются различные приборы для обработки

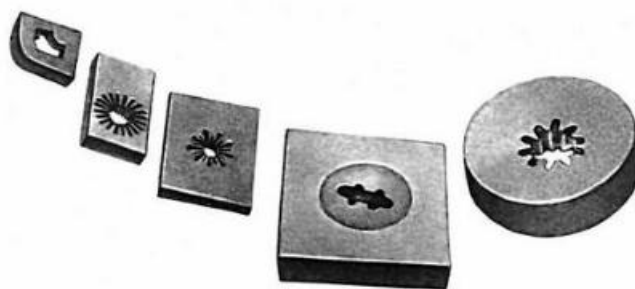
сигнальной информации в микроэлектронике. ультразвук играет большую роль в изучении вещества. Наряду с методами молекулярной акустики для жидкостей и газов, в области изучения твёрдых тел измерение скорости ϑ и коэффициента поглощения α используются для определения модулей упругости и диссипативных характеристик вещества. Получила развитие квантовая акустика, изучающая взаимодействие квантов упругих возмущений — фононов — с электронами, магнонами и др. квазичастицами и элементарными возбуждениями в твёрдых телах. Ультразвук широко применяется в технике, а также ультразвуковые методы всё больше проникают в биологию и медицину. По данным измерений ϑ и α , во многих технических задачах осуществляется контроль за протеканием того или иного процесса (контроль концентрации смеси газов, состава различных жидкостей и т.д.). Используя явление отражения ультразвука на границе различных сред, конструируют ультразвуковые приборы для измерения размеров изделий (например, ультразвуковые толщиномеры), для определения уровня жидкости в больших, недоступных для прямого измерения ёмкостях. Ультразвук сравнительно малой интенсивности (до $\sim 0,1$ Вт/см²) широко используется для целей неразрушающего контроля изделий из твёрдых материалов (рельсов, крупных отливок, качественного проката и т.д.). Быстро развивается направление дефектоскопии, получившее название акустической эмиссии, которая состоит в том, что при приложении механического напряжения к образцу (конструкции) твёрдого тела он «потрескивает» (подобно тому, как при изгибе «потрескивает» оловянный стержень). Это объясняется тем, что в образце возникает движение дислокаций, которые при определённых условиях (до конца ещё пока не выясненных) становятся источниками (так же, как и совокупность дислокаций и субмикроскопических трещин) акустических импульсов со спектром, содержащим частоты ультразвука. При помощи акустической эмиссии удаётся обнаружить образование и развитие трещины, а также определить её местонахождение в ответственных деталях различных конструкций. При помощи ультразвука осуществляется звуковидение: преобразуя ультразвуковые колебания в электрические, а последние — в световые, оказывается возможным при помощи ультразвука видеть те или иные предметы в непрозрачной для света среде. На частотах УЗВЧ диапазона создан ультразвуковой микроскоп — прибор, аналогичный обычному микроскопу, преимущество которого перед оптическим состоит в том, что при биологических исследованиях не требуется предварительного окрашивания предмета (рис. 5). Развитие голографии привело к определённым успехам в области ультразвуковой голографии.



(рис.5)

Весьма важную роль ультразвук играет в гидроакустике, поскольку упругие волны являются единственным видом волн, хорошо распространяющимся в морской воде. На принципе отражения ультразвуковых импульсов от препятствий, возникающих на пути их распространения, строится работа таких приборов, как эхолот, гидролокатор. Ультразвук

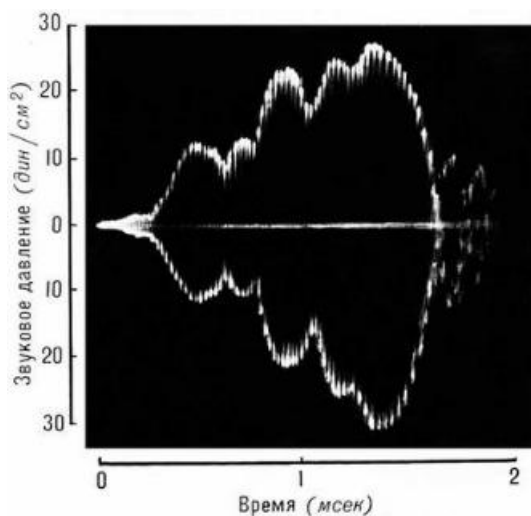
большой интенсивности (главным образом диапазон УНЧ) оказывает воздействие на протекание тех или иных технологических процессов посредством нелинейных эффектов — кавитации, акустических потоков и др. Так, при помощи мощного ультразвука ускоряется ряд процессов тепло- и массообмена в металлургии. Воздействие ультразвуковых колебаний непосредственно на расплавы позволяет получить более мелкокристаллическую и однородную структуру металла. Ультразвуковая кавитация широко используется для очистки от загрязнений как мелких (часовое производство, приборостроение, электронная техника), так и крупных производственных деталей (трансформаторное железо, прокат и др.). С помощью ультразвука удаётся осуществить пайку алюминиевых изделий. В микроэлектронике и полупроводниковой технике используется ультразвуковая приварка тонких проводников к напылённым металлическим плёнкам и непосредственно к полупроводникам. С помощью ультразвуковой сварки соединяют пластмассовые детали, полимерные плёнки, синтетические ткани и др. Во всех этих случаях ту или иную роль играет процесс ультразвуковой очистки, локальное нагревание под действием ультразвука, ускорение процессов диффузии, изменение состояния полимера. Ультразвук позволяет обрабатывать хрупкие детали (например, стекло, керамику), а также детали сложной конфигурации (рис. 6). В этих процессах основную роль играют удары ультразвукового инструмента по частицам абразивной суспензии.



(рис.6)

Ультразвук в биологии — биологическое действие ультразвука. При действии ультразвука на биологические объекты в облучаемых органах и тканях на расстояниях, равных половине длины волны, могут возникать разности давлений от единиц до десятков атмосфер. Столь интенсивные воздействия приводят к разнообразным биологическим эффектам, физическая природа которых определяется совместным действием механических, тепловых и физико-химических явлений, сопутствующих распространению ультразвука в среде. Биологическое действие ультразвука, то есть изменения, вызываемые в жизнедеятельности и структурах биологических объектов при воздействии на них ультразвука, определяется главным образом интенсивностью ультразвука и длительностью облучения и может оказывать как положительное, так и отрицательное влияние на жизнедеятельность организмов. Так, возникающие при сравнительно небольших интенсивностях $У$. (до 1—2) Вт/см² механические колебания частиц производят своеобразный микро-массаж тканей, способствующий лучшему обмену веществ и лучшему снабжению тканей кровью и лимфой. Повышение интенсивности ультразвук может привести к возникновению в биологических средах акустической кавитации, сопровождающейся механическим разрушением клеток и тканей (кавитационными зародышами служат имеющиеся в биологических средах газовые пузырьки). При поглощении ультразвука в биологических объектах происходит преобразование акустической энергии в тепловую. Локальный нагрев тканей на доли и единицы градусов, как правило, способствует жизнедеятельности биологических объектов, повышая интенсивность процессов обмена веществ. Однако более интенсивные и длительные

воздействия могут привести к перегреву биологических структур и их разрушению (денатурация белков и др.). В основе биологического действия У. могут лежать также вторичные физико-химические эффекты. Так, при образовании акустических потоков может происходить перемешивание внутриклеточных структур. Кавитация приводит к разрыву молекулярных связей в биополимерах и др. жизненно важных соединениях и к развитию окислительно-восстановительных реакций. У. повышает проницаемость биологических мембран, вследствие чего происходит ускорение процессов обмена веществ из-за диффузии. Все перечисленные факторы в реальных условиях действуют на биологические объекты в том или ином сочетании совместно, и поэтому трудно, а подчас невозможно раздельно исследовать процессы, имеющие различную физическую природу. Ультразвуковая хирургия подразделяется на две разновидности, одна из которых связана с разрушением тканей собственно звуковыми колебаниями, а вторая — с наложением ультразвуковых колебаний на хирургический инструмент. В первом случае применяется фокусированный ультразвук с частотами порядка (10^6 — 10^7) Гц, во втором — колебания на частотах (20—75) кГц с амплитудой (10—50)мкм. Ультразвуковые инструменты применяются для рассечения мягких и костных тканей, позволяя при этом существенно уменьшать усилие резания, кровопотери и болевые ощущения. В травматологии и ортопедии У. используют для сварки сломанных костей: при этих операциях костной стружкой, смешанной с жидкой пластмассой, заполняют пространство между костными отломками; под действием У. образуется их соединение. Ультразвук применяется также в биологической и медицинской лабораторной практике, в частности — для диспергирования биологических структур, для относительно тонких воздействий на структуру клеток, при стерилизации инструментов и лекарственных веществ, для изготовления аэрозолей, а также в бактериологии, иммунологии и т.д. для получения ферментов и антигенов из бактерий и вирусов, изучения морфологических особенностей и антигенной активности бактериальных клеток и др. Целый ряд животных способен воспринимать и излучать частоты упругих волн значительно выше 20 кГц. Так, птицы болезненно реагируют на ультразвуковые частоты более 25 кГц, что используется, например, для отпугивания чаек от водоёмов с питьевой водой. Мелкие насекомые при своём полёте создают ультразвуковые волны. Летучие мыши, имея совсем слабое зрение, или вовсе не имея его, ориентируются в полёте и ловят добычу методом ультразвуковой локации. Они излучают своим голосовым аппаратом ультразвуковые импульсы (рис. 7) с частотой повторения несколько Гц и несущей частотой (50—60) кГц. Дельфины излучают и воспринимают ультразвук до частот 170 кГц; метод ультразвуковой локации у них развит, по-видимому, ещё совершеннее, чем у летучей мыши.



(рис.7)

Список литературы

1. Бергман Л., Ультразвук, пер. с нем., М., 1956;
2. Красильников В. А., Звуковые и ультразвуковые волны в воздухе, воде и твердых телах, 3 изд., М., 1960;
3. Физическая акустика, под ред. У. Мэзона, пер. с англ., т. 1—7, М., 1966—74;
4. Физика и техника мощного ультразвука, под ред. Л. Д. Розенберга, т. 1—3, 1967—69;
5. Михайлов И. Г., Соловьев В. А., Сырников Ю. П., Основы молекулярной акустики, М., 1964;
6. Виктор И. А., Физические основы применения ультразвуковых волн Рэля и Лэмба в технике, М., 1966;
7. Ergashev A.J. Didactic capabilities of elearning resources in improving the effectiveness of teaching nuclear technology in higher educational institutions 302-page //Journal of exercise physiology–USA: 2022 y. P. 302-303.
8. Ergashev A.J. Organization of pedagogical experimental work and analysis of its results in teaching the science of nuclear technologies in higher education institutions. Eurasian Journal of Learning and Academic Teaching – USA. -2023 y. P. 23-28.