

ВСЕСОЮЗНОЕ ОБЩЕСТВО
ПО РАСПРОСТРАНЕНИЮ
ПОЛИТИЧЕСКИХ И НАУЧНЫХ
ЗНАНИЙ

ЛАУРЕАТ СТАЛИНСКОЙ ПРЕМИИ
ДОКТОР ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК
ПРОФЕССОР

Л. Д. РОЗЕНБЕРГ

УЛЬТРАЗВУК В ТЕХНИКЕ

Серия IV
№ 20

ИЗДАТЕЛЬСТВО «ЗНАНИЕ»

Москва — 1955

ВСЕСОЮЗНОЕ ОБЩЕСТВО
ПО РАСПРОСТРАНЕНИЮ ПОЛИТИЧЕСКИХ И НАУЧНЫХ ЗНАНИЙ

Лауреат Сталинской премии
доктор технических наук
профессор
Л. Д. РОЗЕНБЕРГ

УЛЬТРАЗВУК В ТЕХНИКЕ

Стенограмма публичной лекции,
прочитанной в Центральном
лектории Общества в Москве

ИЗДАТЕЛЬСТВО «ЗНАНИЕ»

Москва



1955

СОДЕРЖАНИЕ

	<i>Стр.</i>
Введение	3
Основные свойства ультразвука	3
Методы получения ультразвука	8
Механические излучатели	8
Электромеханические излучатели	11
Фокусирование ультразвуковых волн	16
Промышленное применение ультразвука	18
Измерение расстояний и обнаружение препятствий	19
Выявление внутренних дефектов	23
Измерение скорости потока	27
Дробящее действие ультразвука	28
Ультразвуковая очистка	33
Получение эмульсий	34
Ускорение диффузионных процессов	35
Очистка газов и жидкостей	36
Литература	40

★ К ЧИТАТЕЛЯМ ★

Издательство «Знание» Всесоюзного общества
по распространению политических и научных
знаний просит присылать отзывы об этой брошюре
по адресу: Москва, Новая площадь, д. 3/4.



Автор
Лазарь Давыдович Розенберг.

Редактор **С. Е. Кипнис.**
Техн. редактор **П. Г. Ислентьева.**
Корректор **В. М. Сергеева.**

А 04466. Подписано к печати 20/VIII 1955 г. Тираж 55 000 экз. Изд. № 196.
Бумага 60×92¹/₁₆—1,25 бум. л.=2,5 п. л. Учетно-изд. 2,55 л. Заказ № 1897.

Ордена Ленина типография газеты «Правда» имени И. В. Сталина.
Москва, ул. «Правды», 24.

Введение

Как известно, ультразвуковые колебания находят широкое применение в различных областях промышленности. Эти применения чрезвычайно разнообразны. Наряду с дефектоскопией, измерением расстояний и геометрических размеров ультразвук применяется и как активное средство воздействия на вещество или на ход технологического процесса.

Хотя все особенности промышленного применения ультразвука вытекают из его физических свойств, уровень наших знаний в настоящее время далеко не всегда позволяет точно представить себе механизм того или иного воздействия. Мы находимся на таком этапе, когда техника в этой области опередила науку. Правда, неясности механизма воздействия ультразвука касаются почти всегда деталей процесса, а не его основ. Параллельно с углублением и расширением наших знаний в области физики ультразвука будут расти и расширяться многочисленные области его технического применения.

Цель настоящей лекции — рассказать о наиболее важных и интересных областях применения ультразвука. Для того чтобы материал лекции был доступен для широкого круга читателей, вначале кратко излагаются основные свойства и особенности ультразвуковых колебаний.

Основные свойства ультразвука

Напомним кратко, что звуковые волны — это упругие волны, распространяющиеся в газах, жидкостях и твердых телах. Источником звука может являться любое колеблющееся тело. Сжатия и разрежения среды, вызываемые колебательным процессом, распространяются во все стороны в виде упругих волн. Скорость распространения звуковых волн зависит только от свойств данной среды. В воздухе она равна 340 м/сек, в воде — 1500 м/сек, в алюминии — 6200 м/сек. Приведенные цифры являются средними и могут несколько изменяться в зависимости от температуры, содержания даже малых количеств различных примесей и от давления (для жидкостей и газов). Совокупность одного сжатия и одного разрежения образует

один полный цикл колебания. Количество таких циклов в секунду носит название частоты данного звука и является характерной величиной, определяющей его высоту. Самым низким звукам (удары барабана, звуки басовых труб и др.), воспринимаемым человеческим ухом, соответствуют частоты 40—100 *гц* (1 *гц* — один герц — соответствует одному колебанию в секунду; 1 *кгц* — один килогерц — равен 1 тыс. *гц*). Высоким звукам (флейта, свисток, комариный писк) соответствуют большие частоты: 6—8 тыс. *гц*. Звуки более высокие, чем 15 тыс. *гц*, нашим ухом не воспринимаются; они носят название ультразвуков. Правда, в последнее время работами советских и зарубежных исследователей было установлено, что человеческий организм в состоянии воспринимать и более высокие звуки — до 30—40 тыс. *гц*, однако это восприятие, повидимому, не имеет ничего общего с обычным слуховым восприятием: изменение частоты при этом не создает ощущения изменения высоты звука.

Граница между слышимыми звуками и ультразвуками носит в известной степени условный характер, тем более, что многие животные хорошо воспринимают ультразвуковые колебания и реагируют на них так же, как и на обычные звуковые колебания. Верхняя граница ультразвуков теоретически определяется их поглощением при распространении. Как известно, это поглощение сильно увеличивается с ростом частоты. Исходя из этих соображений, можно ожидать, что в материалах с самым малым поглощением, например в кристаллах кварца, высшая граница ультразвуковых частот должна находиться около 100 млрд. *гц*. Звуки такой частоты экспериментально еще не получены. Самые высокие звуки, пока с частотой около 1 млрд. *гц*, удалось получить советскому ученому С. Я. Соколову.

Наряду с частотой характерным параметром каждого звукового колебания является длина волны, т. е. расстояние, которое звуковая волна проходит за время одного полного колебания. Из этого определения вытекает основное соотношение, связывающее частоту звуковых колебаний f и длину волны λ со скоростью распространения звука c в данной среде. В самом деле, если за время одного полного колебания звуковая волна проходит путь, равный λ , то за секунду она пройдет в f раз больше, так как в течение секунды совершается f полных колебаний. С другой стороны, путь, проходимый волной в течение секунды, — это ее скорость распространения в данной среде. Таким образом, видно, что $c = \lambda f$.

Из этого соотношения следует, что для каждой среды длина волны и частоты обратно пропорциональны: чем больше частота, тем меньше длина волны.

Так как частоты ультразвуков значительно больше, чем частоты слышимых звуков, то длины волн их соответственно ко-

роче. Это обстоятельство объясняет одну из особенностей ультразвуковых колебаний — возможность их прямолинейного распространения (подобно лучам света), в отличие от ненаправленного распространения обычных звуковых волн.

Мы привыкли к тому, что звуковые волны распространяются во все стороны от их источника. Поэтому говорят, что источники слышимых звуков ненаправленны или малонаправленны. Если звуковая волна проходит через небольшое отверстие, то она продолжает после этого распространяться во все стороны, а не идет направленным пучком, как световой луч, прошедший через дырочку в непрозрачном экране. Шум улицы, проникающий в комнату через открытую форточку, практически одинаково слышен во всех точках комнаты. Почему же звук и свет, представляющие собой волновые процессы, обладают такими, казалось бы, прямо противоположными свойствами? Оказывается, что характер распространения волн у препятствия существенно зависит от соотношения между размерами этого препятствия и длиной волны. Если размеры препятствия малы или соизмеримы с длиной волны, то волны обтекают это препятствие, не давая тени. Аналогично этому волны, пройдя через отверстие, размеры которого тоже малы по сравнению с длиной волны, распространяются (растекаются) во все стороны. Если же препятствие велико по сравнению с длиной волны, то такое растекание не имеет места и за препятствием образуется тень.

Так как ультразвуки обладают очень малыми длинами волн, то они тоже в состоянии давать звуковые тени и могут распространяться в виде узких пучков, которые, по аналогии со световыми, называют ультразвуковыми лучами.

Ультразвуковые лучи во многом сходны со световыми. Они могут отражаться, преломляться и фокусироваться по законам, аналогичным законам геометрической оптики: угол падения звукового луча равен углу отражения; при переходе из одной среды в другую ультразвуковой луч преломляется, т. е. меняет направление своего распространения.

Малые длины ультразвуковых волн и связанная с этим возможность получения ультразвуковых лучей позволяют не только сосредоточивать всю энергию звука в нужном направлении, но и фокусировать его, т. е. концентрировать всю энергию в небольшом объеме. Для фокусирования ультразвуков, так же как и для фокусирования световых лучей, могут быть применены вогнутые зеркала, линзы и т. д. Звуковые линзы по форме напоминают обычные оптические, но выполняются из материалов, в которых скорость распространения звука отличается от скорости звуков в окружающей среде. Так, например, для работы в воде можно применять звуковую линзу, изготовленную из плексигласа.

Известно, что кинетическая энергия частицы, например ча-

стицы среды, колеблющейся под действием звуковой волны, определяется ее живой силой, т. е. половиной произведения массы частицы на квадрат ее скорости. С другой стороны, известно, что при неизменной амплитуде скорость колебания частицы пропорциональна частоте. Отсюда следует, что кинетическая энергия колеблющейся частицы пропорциональна квадрату частоты колебания. Этим и объясняется то обстоятельство, что ультразвуки могут нести значительно большие мощности, чем привычные нам слышимые звуки. Если для звуковой волны, соответствующей громкости обычного разговора, интенсивность (т. е. мощность, приходящаяся на единицу поверхности) составляет приблизительно одну миллиардную часть ватта на квадратный сантиметр, то интенсивности ультразвуков исчисляются ваттами и даже десятками ватт на квадратный сантиметр.

Мы уже говорили, что процесс распространения звуковых волн в жидкостях и газах состоит из чередующихся сжатий и разрежений среды. Это значит, что к давлению, существующему в данной среде при отсутствии звука (например, к атмосферному), прибавляется или из него вычитается некоторое дополнительное, избыточное давление, обусловленное прохождением волны разрежения звука. Это избыточное давление непосредственно связано с интенсивностью звука и носит название звукового давления. Для обычных слышимых звуков это давление очень мало: так, для разговорной речи средней громкости оно составляет около $0,001 \text{ г/см}^2$.

В ультразвуках, вследствие значительной интенсивности, избыточные давления могут принимать очень большие значения. Например, в воде при прохождении ультразвука средней интенсивности ($3\text{--}5 \text{ вт/см}^2$) избыточное звуковое давление равняется нескольким атмосферам. Такая большая величина звукового давления в жидкости приводит к качественно новому явлению, которое называется кавитацией.

Как уже говорилось, звуковое давление то положительно, то отрицательно, т. е. в момент прохождения фазы сжатия объем жидкости подвергается всестороннему давлению в несколько атмосфер, а в момент прохождения фазы разрежения (т. е. во время отрицательного давления) на этот же самый объем действуют растягивающие силы. Большие сжатия жидкость «переносит» легко, но при приложении растягивающих усилий она не выдерживает и рвется. Эти разрывы происходят в местах, где прочность жидкости ослаблена; в жидкостях такими местами являются мельчайшие пузырьки газа, так называемые газовые зародыши, а также частицы примесей.

В результате разрывов в жидкости образуется ряд маленьких полостей (кавитационных пузырьков), которые после кратковременного существования захлопываются. При захлопывании развиваются чрезвычайно большие силы: мгновенные

давления могут доходить до нескольких тысяч атмосфер. Эти кратковременные пики давлений сопровождаются сильными местными повышениями температуры.

Огромные давления, развивающиеся в момент захлопывания пузырьков, могут приводить к механическим разрушениям поверхности твердого тела, находящегося вблизи места захлопывания. Однако этим не исчерпывается вторичный эффект, вызываемый кавитационными пузырьками. Советский ученый Я. И. Френкель сделал подтвердившееся впоследствии предположение, что образование и захлопывание пузырьков сопровождается местной электризацией; в пузырьках проскакивают мельчайшие искорки, отчего вся жидкость начинает слабо светиться. Повидимому, электрические явления, возникающие при кавитации, оказывают влияние на химическое действие ультразвуков.

Рассмотрим, каково ускорение частиц, колеблющихся под действием ультразвуковой волны. Известно, что в качестве единицы ускорения обычно выбирается ускорение силы тяжести, обусловливаемое тяготением Земли. Это ускорение g составляет $9,81 \text{ м/сек}^2$. Мы ощущаем ускорение, например, при начале движения или при остановке лифта; небольшие ускорения, в $1,5$ — 2 раза больше, чем g , легко переносятся человеческим организмом. Когда, например, летчик делает фигуры высшего пилотажа, очень крутой вираж или выход из пике, то вследствие центробежной силы на него действует ускорение, превышающее ускорение силы земного тяготения. Пока это ускорение составляет 5 — $6 g$, тренированный летчик чувствует себя еще неплохо, но когда это ускорение достигает 8 — $10 g$, наступают болезненные явления, которые могут закончиться даже смертью.

Ускорение частиц жидкости, получающееся в результате прохождения звуковой волны, соответствующей разговору средней громкости, составляет несколько сотых долей g и, конечно, не может оказать существенного влияния на среду. Под действием же ультразвуковых колебаний ускорение может достигать величины сотен тысяч и даже миллионов g . Такие огромные ускорения могут вызвать механические разрушения частичек среды.

Из всего сказанного следует, что отличительной чертой ультразвуков является то, что они несут большую механическую энергию. Это вызывает весьма значительные ускорения и связанные с ними очень большие мгновенные перемены давления в среде. В результате этого в моменты отрицательных фаз в жидкой среде образуются разрывы сплошности — кавитационные пузырьки. Захлопывание пузырьков сопровождается сильными кратковременными ударами, при этом давление достигает нескольких тысяч атмосфер, что сопровождается местными повышениями температуры и электризацией среды.

Методы получения ультразвука

Ультразвуковые колебания, так же как и слышимые звуки, существуют в природе. Шум ветра, шум морского прибоя, наряду со слышимыми звуками, содержит и неслышимые ультразвуки. Целый ряд насекомых, например сверчки, цикады, кузнечики и др., издают и воспринимают ультразвуки. Собаки обладают способностью «слышать» ультразвуковые колебания частотой до 30—35 тыс. *гц*. Этим пользуются, например, для подачи собакам ультразвуковых командных сигналов, которые остаются неслышимыми для окружающих людей. Такие ультразвуковые «приказания» применяются при управлении служебными собаками и дрессировщиками в цирке. Сигналы подаются находящимся, например, в кармане ультразвуковым свистком, приводимым в действие резиновой грушей.

Для изучения, а тем более для применения ультразвуковых колебаний, природные, случайные их источники, конечно, непригодны. Нужно уметь получать ультразвуковые колебания нужных частот и мощностей искусственным способом.

Приборы, которые служат для искусственного получения ультразвуков, называются ультразвуковыми излучателями, или, для краткости, просто излучателями. Существующие типы излучателей могут быть разбиты на две основные группы: механические и электромеханические.

Механические излучатели (свистки, сирены). Простейшим типом механического излучателя звука является всем известный свисток, в котором процесс возбуждения звуковых колебаний происходит за счет того, что струя воздуха разбивается об острый край внутренней полости свистка. Размеры этой полости определяют частоту и, следовательно, высоту получающегося звука: чем меньше размеры полости, тем выше звук. Уменьшая размеры, нетрудно добиться того, что свисток начнет издавать неслышимые звуки.

Такой простейший механический генератор ультразвука обладает существенным недостатком — его мощность мала. Для повышения мощности нужно увеличить поток газа, протекающего через свисток. При этом возникают некоторые побочные явления (которых мы здесь касаться не будем), способствующие повышению ультразвуковой мощности свистка. Струйный генератор ультразвука (иногда его называют по имени изобретателя — генератором Хартманна) изображен на рис. 1. Через нижний патрубок *1* поступает воздух или газ, подающийся под давлением около 2,5 *атм*. Сверху, над патрубком *1*, находится полость *2* с острым краем *3*, о который разбивается струя. Металлическое кольцо *4* жестко скрепляет эти основные детали струйного генератора. Такой генератор может создавать ультразвуки в диапазоне частот от 4 до 60 тыс. *гц* и отдавать до 100 *вт* звуковой мощности.

Ультразвуковые генераторы, так же как и любые другие генераторы, оцениваются по коэффициенту полезного действия, под которым нужно понимать отношение мощности полученного ультразвука ко всей той мощности, которая была затрачена на его получение.

Струйный генератор обладает небольшим коэффициентом полезного действия — всего лишь несколько процентов. Однако он довольно часто применяется в практике, так как прост, удобен в эксплуатации, дешев и не требует никаких специальных дополнительных приспособлений, работая от обычного компрессора или просто от баллона со сжатым воздухом. Излучение ультразвука таким генератором происходит более или менее одинаково во все стороны. Поэтому если хотят получить направленный ультразвуковой пучок, то помещают струйный генератор в фокусе вогнутого зеркала, аналогично тому, как для получения направленного светового пучка при помощи прожектора в фокусе зеркала ставят электрическую дугу или лампу накаливания.

В ряде случаев, однако, ультразвук требуется получить не в воздухе, а в жидкости, например в воде. Было бы бесполезно для этой цели помещать струйный генератор или какой-нибудь другой источник ультразвука в воздухе над поверхностью воды. Дело в том, что звуковые волны очень плохо проходят из воды в воздух и из воздуха в воду. Большая часть звуковой энергии отражается от границы раздела, и лишь очень незначительная часть проникает в соседнюю среду. Поэтому для получения в жидкости сколько-нибудь мощного ультразвука, его нужно там же и возбудить.

Для этой цели часто применяется прибор, который носит название жидкостного свистка. Схема такого жидкостного свистка изображена на рис. 2. Принцип его действия такой же, как и воздушного свистка. Струя жидкости под давлением подается через сопло 1 и по выходе из него разбивается об острие пластинки 2. При этом пластинка, закрепленная в точках 3, приходит в колебательное движение (схематически показано в нижней части рисунка) и дает два пучка 4 ультразвука, направленные вверх и вниз, перпендикулярно к поверхности пластинки. Такой жидкостный свисток способен работать

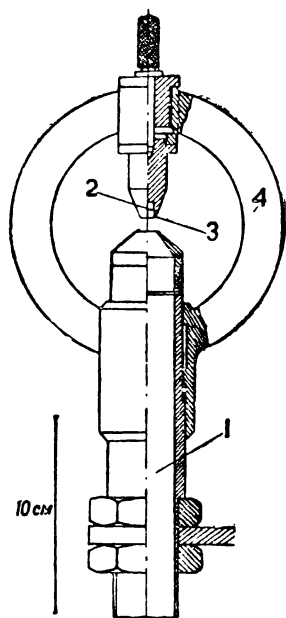


Рис. 1. Струйный генератор ультразвука (разрез):

- 1 — нижний патрубок; 2 — полость; 3 — острый край; 4 — соединительное кольцо.

в диапазоне частот от 4 до 30 тыс. гц и может дать несколько десятков ватт полезной мощности.

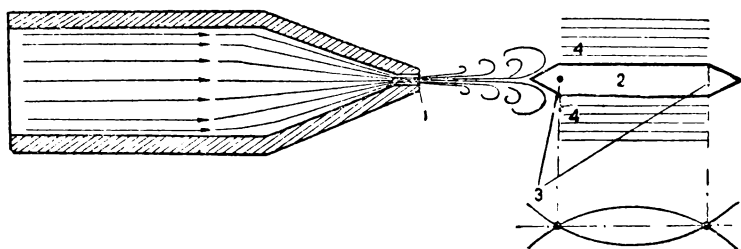


Рис. 2. Схема жидкостного свистка:

1 — сопло; 2 — пластинка с острыми краями; 3 — точки закрепления пластинки; 4 — ультразвуковые волны.

На ином принципе работают сирены, часто применяемые для получения мощных ультразвуковых колебаний в воздухе. Устройство ультразвуковой сирены совершенно аналогично устройству обычной звуковой сирены. На рис. 3 изображены два находящихся один вблизи другого металлических диска 1 и 2, по периферии которых просверлен ряд отверстий 3. Если один из дисков начать вращать, то его отверстия будут совпадать с отверстиями неподвижного диска только в определенные моменты времени. Если через эти диски направить струю 4 воздуха, то в те моменты, когда отверстия совпадают, она будет проходить через диски. В остальное время путь для нее будет закрыт. Таким образом, после прохождения струи через диски вместо непрерывного потока воздуха получается ряд пульсаций, частота которых будет зависеть от количества отверстий в дисках и скорости вращения подвижного диска. Полученные таким образом пульсации и являются источником мощных звуковых волн.

Современные ультразвуковые сирены работают в диапазоне частот от 10 до 200 тыс. гц и могут дать несколько киловатт полезной мощности при коэффициенте полезного действия 50—70%. Создаваемые ими интенсивности звука на выходе доходят до 10 вт/см^2 . Однако получение таких значительных мощностей в жидкости при высоком коэффициенте полезного действия является пока еще не разрешенной технической задачей; это в значительной степени задерживает широкое внедрение ультразвука в промышленности.

Подводя итоги, можно сказать, что существующие в настоящее время механические источники ультразвука являются простыми, надежными и эффективными генераторами. Недостатки их: сравнительно низкая генерируемая частота (десятки или

в лучшем случае сотни тысяч герц) и невозможность в настоящее время получения от таких генераторов больших мощностей ультразвука в жидкости.

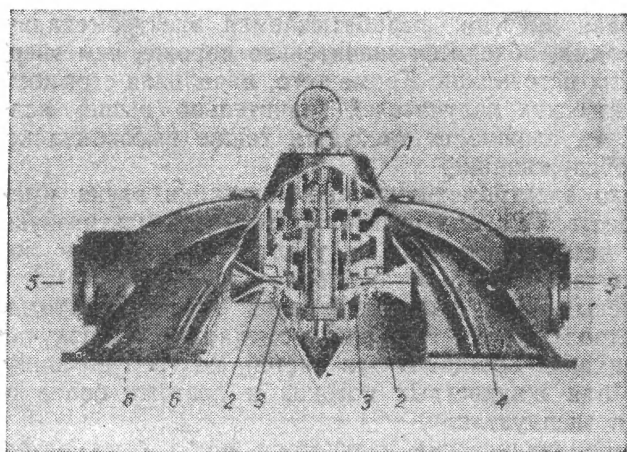
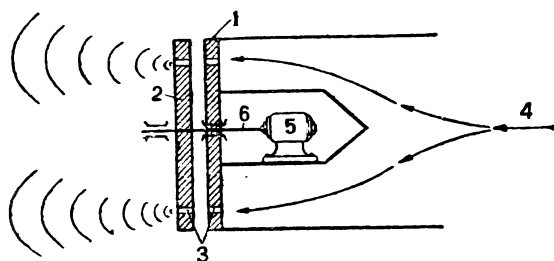


Рис. 3. Ультразвуковая сирена.

Вверху—схема сирены: 1 и 2 металлические диски; 3—отверстия; 4—струя воздуха; 5—электромотор; 6—ось вращения. Внизу—внешний вид сирены: 1—турбина (назначение то же, что и электромотора на схеме); 2—статор; 3—ротор; 4—рупор; 5—подача сжатого воздуха, 6—направление ультразвуков.

Электромеханические излучатели. В электро-механических излучателях звук получается путем преобразования колебаний электрического тока соответствующей частоты в механические колебания излучателя. Следовательно, для приведения в действие электромеханического излучателя необходим переменный ток частоты, соответствующей частоте ультразвука, которую мы хотим получить.

Сама по себе задача получения переменного электрического тока достаточной мощности и любой частоты в настоящее время полностью разрешена. Генераторы переменного тока ши-

роко распространены в современной технике и используются для получения тока от самой низкой, так называемой промышленной частоты (50 *гц*), до самых высоких радиочастот (миллионы и миллиарды герц), применяемых в радиосвязи, телевидении и радиолокации. Для всего интересующего нас диапазона ультразвуковых частот существуют конструктивно разработанные и используемые в эксплуатации электрические генераторы любой мощности. Однако эти генераторы являются сравнительно сложными в эксплуатации и дорогостоящими приборами, коэффициент полезного действия которых составляет 30—50%, и, следовательно, стоимость электроэнергии повышенной частоты значительно больше, чем стоимость промышленной энергии. Если добавить к этому, что коэффициент полезного действия самих электромеханических преобразователей тоже лежит в пределах 30—60%, то станет ясно, что ультразвуковая энергия, вырабатываемая электромеханическими излучателями, обходится значительно дороже, чем энергия механических источников. Кроме того, начальная стоимость электромеханических излучателей значительно выше; вследствие большой их сложности требуется также высококвалифицированное обслуживание.

Однако электромеханические источники звука имеют ряд преимуществ. Так, они позволяют получать ультразвуки очень высоких частот (что пока не удается при помощи механических излучателей), работают более устойчиво и могут быть изготовлены очень малых размеров (несколько квадратных миллиметров). Кроме того, электромеханические излучатели не имеют никаких вращающихся частей, не требуют применения газовых или жидкостных потоков и поэтому более гибки и удобны в эксплуатации.

Электромеханические излучатели могут быть разбиты на три группы: электродинамические, магнитострикционные и пьезоэлектрические (электрострикционные). Эти группы, кроме принципа действия (о котором речь будет ниже), различаются также по тем диапазонам частот, в которых они могут применяться. Так, электродинамические излучатели работают в пределах до 30 тыс. *гц*, магнитострикционные — от 5 до 150 тыс. *гц* и пьезоэлектрические — от 100 тыс. *гц* и выше.

Электродинамические излучатели по принципу действия ничем не отличаются от громкоговорителей. Они только видоизменены для лучшей передачи высоких частот за счет ухудшения воспроизведения ненужных в данном случае низких звуковых частот. В диапазоне частот 5—30 тыс. *гц* они могут создавать интенсивность в 1—2 *вт/см²* при коэффициенте полезного действия 30%.

Для лабораторных исследований и полупромышленных испытаний чаще всего применяют магнитострикционные и пьезоэлектрические излучатели. Механизм их действия, хотя и

обусловлен совершенно различными физическими процессами, однако имеет внешне много общего.

Явление магнитострикции, так же как и явление электрострикции, заключается в том, что размеры некоторых материалов могут изменяться под действием магнитного или, соответственно, электрического поля. Так, например, никелевая трубка уменьшает свою длину в сильном магнитном поле (магнитострикция), а пластинка, вырезанная из кристалла кварца, изменяет свои размеры, если ее поместить в электрическое поле (электрострикция). Процесс изменения размеров точно и очень быстро следует за процессом изменения величины поля. Поэтому если приложенное поле не постоянно по своей величине, а меняется с определенной частотой, то с той же самой частотой будет меняться размер тела, находящегося в этом поле. Меняя поле с частотой слышимых звуков, мы заставим это тело колебаться и, следовательно, излучать слышимые звуки; меняя же поле с частотой ультразвуков, мы соответственно получим ультразвуковые колебания.

Наилучшими материалами для магнитострикционных излучателей являются никель, нержавеющая сталь и некоторые сплавы, как, например, пермаллой и пермендиур. Для пьезоэлектрических излучателей чаще всего используется кварц, реже — фосфат аммония. В последнее время начинает получать широкое применение новый пьезоэлектрический материал, разработанный советскими учеными (членом-корреспондентом Академии наук СССР Б. М. Вул с сотрудниками), — керамика титаната бария.

Не вдаваясь в подробности конструкций, отметим лишь, что магнитострикционные излучатели чаще всего имеют вид сплошных или полых стержней, на которые наложена обмотка, обтекаемая переменным током нужной частоты. Для получения сильных магнитных полей, а следовательно, и больших излу-

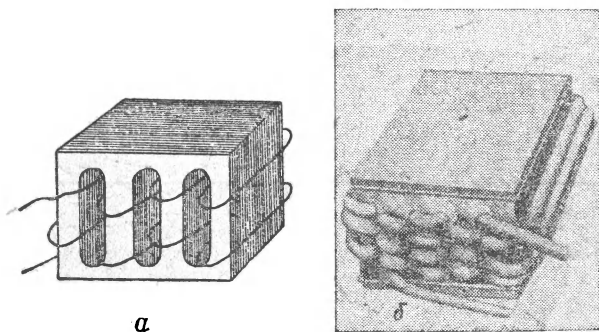


Рис. 4 Магнитострикционный излучатель:
а — схема; б — внешний вид.

чаемых мощностей, нужен значительный ток при сравнительно малом напряжении. Часто для уменьшения потерь тело самого стержня набирается из тонких изолированных друг от друга пластин (рис. 4) подобно тому, как это делается в обычных трансформаторах. Интенсивность, которую можно получить от магнитострикционного генератора, достигает нескольких десятков ватт с квадратного сантиметра при коэффициенте полезного действия 50—60%.

Как уже отмечалось, единственными излучателями, способными генерировать ультразвуковые колебания самых высоких частот, являются кварцевые излучатели, и поэтому в данной области они имеют исключительное применение. Конструктивно — это чаще всего вырезанная определенным образом из кристалла пластинка (рис. 5, а), на противоположных поверхностях которой каким-либо способом нанесены тонкие металлические обкладки (электроды). К этим электродам приклады-

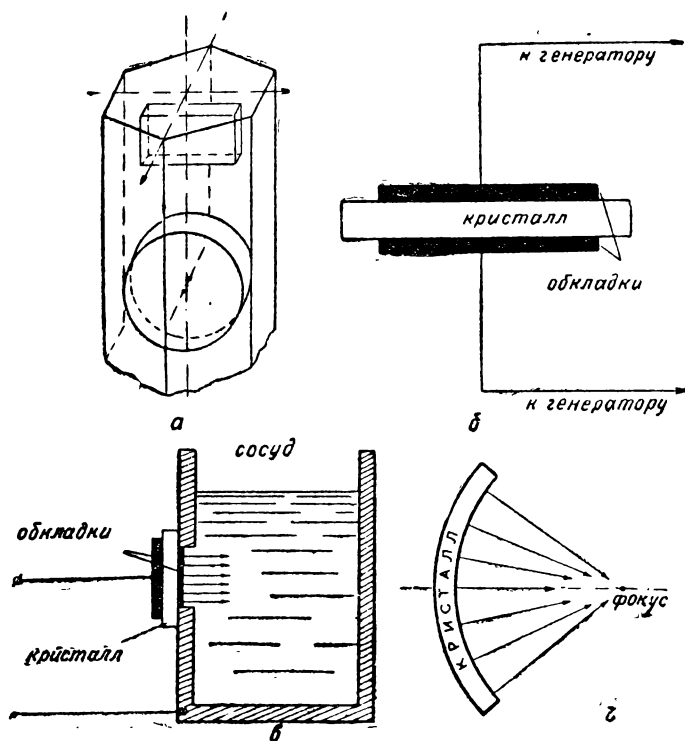


Рис. 5 Пьезоэлектрический излучатель ультразвука:

а — схема выреза пластинки из кристалла кварца; б — кварцевая пластинка с обкладками; в — устройство для излучения в жидкость; г — вогнутый фокусирующий излучатель.

вается напряжение переменного тока требуемой частоты (рис. 5,б).

В отличие от магнитострикционного кварцевый излучатель требует больших напряжений при малых токах. В мощных излучателях эти напряжения достигают тысяч и даже десятков тысяч вольт. Одна или обе металлические обкладки непосредственно соприкасаются с той средой (чаще всего жидкость), в которой нужно возбудить ультразвуковые колебания (рис. 5,в). Интенсивность ультразвуков, полученных в жидкости при помощи кварцевого излучателя, может достигать нескольких десятков ватт с квадратного сантиметра. На рис. 6 показан кварцевый излучатель высокой интенсивности.

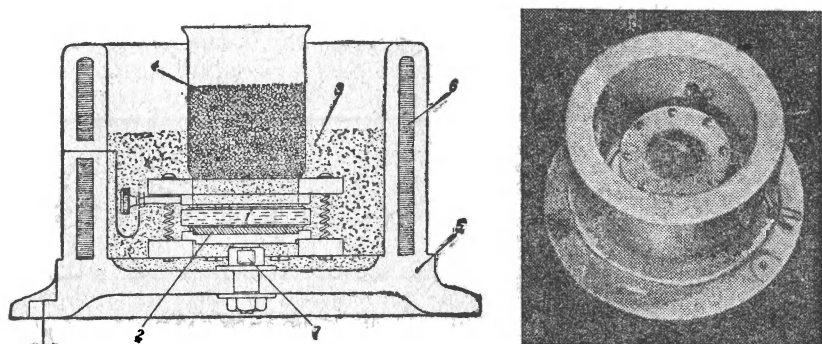


Рис. 6. Лабораторный пьезокварцевый излучатель.

Слева — схема излучателя: 1 — кварцевая пластинка; 2 — электрод; 3 — трансформаторное масло; 4 — сосуд с облучаемым веществом; 5 — корпус; 6 — охлаждение; 7 — контакт высокого напряжения. Справа — внешний вид излучателя.

Большие чистые кристаллы кварца встречаются не часто и поэтому в практике применяют обычные кварцевые пластинки диаметром 3—5 см (пластинки большого размера стоят непропорционально дорого). В силу этого общая мощность, которую можно получить от кварцевого излучателя, невелика — она лимитируется величиной его поверхности. Часто для увеличения рабочей поверхности применяют так называемую кварцевую мозаику, состоящую из значительного количества небольших кварцевых пластин, точно шлифованных и подогнанных друг к другу и составляющих как бы общую излучающую поверхность. Следует отметить, что идея применения эффекта электрострикции, и в частности кварцевых излучателей, для получения ультразвуковых колебаний принадлежит известному французскому физiku П. Ланжевену (1872—1946), который своими исследованиями заложил фундамент науки об ультразвуке.

Титанат бария является синтетическим материалом; он может быть получен любых больших размеров и любой формы и в этом отношении имеет значительные преимущества перед кварцем. Удобно также и то, что для получения одинакового эффекта при применении титаната бария требуются значительно меньшие рабочие напряжения. Единственным недостатком этого материала является его повышенный нагрев, обусловленный сравнительно большими механическими и диэлектрическими потерями. Этот нагрев ограничивает интенсивность получаемого звука ($3\text{--}6 \text{ вт/см}^2$). Важной задачей, стоящей перед физиками и инженерами, является изыскание способов снижения этих потерь и, следовательно, увеличения интенсивности ультразвука.

Фокусирование ультразвуковых волн. Во многих случаях необходима значительно большая интенсивность ультразвука, чем та предельная величина, которая может быть получена с единицы поверхности излучателя. Так, например, все процессы, требующие для своего развития наличия кавитации, идут при интенсивностях, не меньших, чем $5\text{--}7 \text{ вт/см}^2$. При применении титаната бария эта интенсивность является предельной и приходится работать без всякого запаса. Существуют, правда, конструкции с использованием принудительного охлаждения, в которых эта цифра может быть несколько повышена, но сложность таких конструкций ограничивает область их применения. Кроме того, при больших интенсивностях звука кавитация, которая прежде всего возникает на поверхности границы раздела двух фаз и, следовательно, у поверхности излучателя, приводит к быстрому его разрушению. Для предотвращения этого вредного эффекта системе облучения нужно устроить таким образом, чтобы необходимая интенсивность получалась лишь в рабочей области, а у поверхности излучателя кавитация не возникала бы вовсе или была невелика. Этого можно достигнуть, применяя эффект фокусирования.

Как уже отмечалось, ультразвуковые волны можно фокусировать при помощи вогнутых зеркал и звуковых линз. Однако существует еще один метод фокусирования ультразвука, который не применяется в оптике, а именно — фокусирование посредством вогнутого излучателя (рис. 5,2). Для этого поверхности излучателя придают форму отрезка сферы или отрезка цилиндра. Тогда звуковые волны, излученные этой изогнутой поверхностью, будут собираться вблизи центра сферы, в фокальном пятне, или, соответственно, вблизи оси цилиндра, в фокальной полосе. Таким путем легко получить усиление интенсивности в несколько десятков раз. Подбирая соответственно размеры и форму излучателя, можно получить такое звуковое поле, при котором кавитация будет возникать только в районе фокальной области и отсутствовать у поверхности из-

лучателя и в прилегающей к ней части передающей среды (жидкости). Поэтому поверхность излучателя не будет разрушаться ударами кавитационных пузырьков и в передающей среде не будут возникать дополнительные потери, связанные с кавитацией. На рис. 7 изображены основные применяющиеся типы фокусирующих излучателей из титаната бария: отрезок сферы, отрезок цилиндра и трубка.

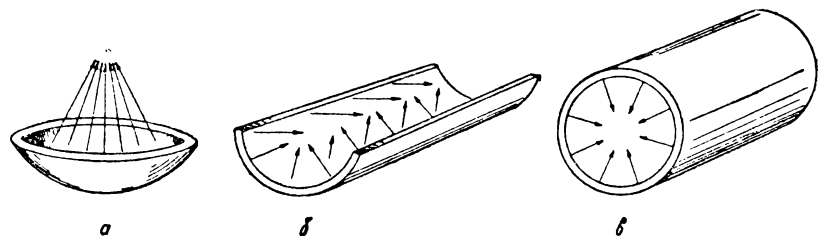


Рис. 7. Форма фокусирующих излучателей из титаната бария:

а — отрезок сферы; б — отрезок цилиндра; в — трубка.

шей поверхности; они применяются в тех случаях, когда объект, на который воздействует ультразвук, имеет небольшие размеры и не перемещается во время облучения. В одной из работ имеется указание, что таким образом на поверхности в несколько квадратных миллиметров была получена интенсивность в 3 тыс. вт/см^2 . При этом переменное давление в воде достигало 120 ати , а ускорение частиц воды под действием ультразвука такой интенсивности составляло 25 млн. g . Устройство такого излучателя показано на рис. 8.

Цилиндрические излучатели дают меньшую концентрацию звуковой энергии, зато их фокальная область вытянута в виде полосы, длина которой равна длине отрезка цилиндра. Эти излучатели удобны в тех случаях, когда облучение объектов производится в режиме потока: деталь, подлежащая обработке ультразвуком, по конвейеру проходит вдоль всей фокальной области цилиндрического отрезка. Если за это время процесс не будет закончен, то рядом с первым излучателем помещают второй или же несколько подряд, увеличивая таким образом длительность времени облучения. Такая схема получила распространение, в частности, при ультразвуковой очистке и обезжиривании мелких деталей.

Так как эффект фокусирования требует применения высоких частот, то магнитострикционные излучатели, работающие на низких ультразвуковых частотах, непригодны. В большинстве случаев применяются излучатели из титаната бария, которые при небольшой стоимости легко могут быть изготовле-

ны любой формы и любого размера. Что касается тепла, выделяемого такими излучателями вследствие больших потерь, то обычно технологический процесс проектируется так, чтобы это тепло подогревало ванну с рабочим раствором, доводя его до необходимой температуры.

В тех случаях, когда требуется облучать большие количества жидкостей, удобнее всего применять излучатели в виде трубок из титаната бария, внутри которых проходит обрабатываемая жидкость.

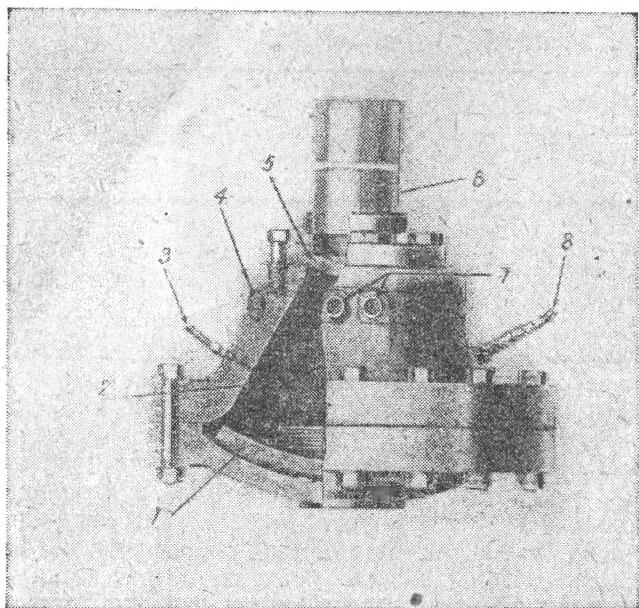


Рис. 8. Устройство фокусирующего излучателя из титаната бария:

1 — пластина титаната бария; 2 — промежуточная жидкость; 3 — насос для обезгаживания; 4 — канал охлаждения; 5 — звукопроницаемая перегородка; 6 — сосуд для обрабатываемого вещества; 7 — ввод и вывод охлаждающей жидкости; 8 — высокочастотный кабель.

Промышленное применение ультразвука

Применение ультразвука в технике настолько разнообразно, что рассказать об этом сколько-нибудь подробно в пределах одной лекции совершенно невозможно. Одно лишь перечисление областей применения ультразвука заняло бы значительное место. Мы остановимся лишь на тех примерах, которые являются наиболее интересными и актуальными.

Вообще все области применения ультразвука могут быть разбиты на две группы: к первой группе мы отнесем те, в которых ультразвук является средством наблюдения, измерения или контроля, ко второй группе — те, в которых ультразвук активно влияет на обрабатываемое вещество или изделие, или же на ход технологического процесса.

Если ультразвуковые методы контроля уже завоевали себе прочное место в промышленности, то области применения, отнесенные ко второй группе, только начинают развиваться. Немаловажное значение здесь имеет и экономическая сторона. В установках для ультразвукового контроля применяются мало мощные излучатели, в технологических же установках ультразвуковые мощности должны исчисляться киловаттами.

Как уже отмечалось, ультразвук (особенно полученный при помощи электромеханических излучателей) представляет собой на сегодняшний день довольно дорогой вид энергии. Это связано с тем, что велика и начальная стоимость установки, велики и эксплуатационные расходы. Данное обстоятельство в значительной степени ограничивает широкое внедрение ультразвуковых методов в технологии. Ультразвук выгодно применять либо в тех случаях, когда технологический процесс требует больших расходов сам по себе и, следовательно, использование ультразвука не очень увеличит его стоимость; либо в тех случаях, когда велика стоимость обрабатываемого продукта. То обстоятельство, что при помощи ультразвука могут быть получены такие результаты, которые не могут быть достигнуты никаким другим способом, далеко не всегда является критерием рентабельности применения ультразвуковых методов обработки. Так, например, известно, что в настоящее время ультразвук применяется в пивоваренном производстве для интенсификации процесса извлечения бродильного фермента (лупулина) из хмеля. При этом получается значительная экономия (15—20%) хмеля и, следовательно, несмотря на большое количество обрабатываемого продукта и сравнительно невысокую стоимость пива, применение ультразвука вполне целесообразно; расходы на оборудование и эксплуатацию быстро окупаются. Однако если бы мы захотели применять ультразвук для извлечения (экстрагирования) ароматических веществ из кофе (вместо того, чтобы заваривать кофе кипятком), то, несмотря на великолепные вкусовые качества полученного таким способом напитка, применение ультразвука в этом случае не было бы оправданным, так как стоимость необходимого для этой цели ультразвукового кофейника составила бы несколько тысяч рублей. Конечно, по мере развития техники генерирования ультразвуков область их применения будет значительно расширяться.

Измерение расстояний и обнаружение препятствий. Исторически ультразвук был впервые при-

менен для обнаружения больших льдин (айсбергов), плавающих в морской воде. Как известно, от столкновения с айсбергом погиб большой океанский пароход «Титаник». Эта катастрофа явилась толчком, побудившим начать интенсивную разработку средств защиты от подобных столкновений.

Метод обнаружения айсбергов был основан на использовании явления эхо, т. е. явления отражения звуковой волны от препятствий. Так как скорость распространения звука в воде хорошо известна, то, зная время, в течение которого звук прошел до препятствия и вернулся обратно, нетрудно определить это расстояние.

Первым предложил применять слышимое эхо (для определения высоты подъема воздушного шара над поверхностью земли) в 1804 году академик Я. Д. Захаров. Впоследствии этот способ получил широкое распространение для определения глубины моря прибором, носящим название эхолота (т. е. прибора, действующего на принципе эхо и позволяющего определить глубину моря в данной точке). До этого глубина моря определялась обычным лотом, т. е. грузом, опускаемым до его соприкосновения с морским дном. Такие измерения занимали очень много времени, особенно при больших глубинах моря, и не отличались достаточной точностью, так как за время опускания и подъема груза корабль сносило иногда на значительное расстояние.

Измерения глубины при помощи эхолота требуют столько времени, сколько нужно звуку для того, чтобы пробежать расстояние от поверхности воды до дна и обратно. Так как скорость звука в морской воде составляет приблизительно 1500 м/сек , то даже для измерения самых больших известных глубин (8—10 км) это время составляет всего лишь 11—14 секунд.

Только благодаря применению эхолота карта морских глубин стала достаточно подробной и вполне достоверной. Однако при применении эхолота, работающего на слышимых звуках, в силу ненаправленности этих звуков, остается неизвестным, с какой стороны пришло эхо — сигнал ли это от предполагаемого дна или от какого-либо другого препятствия, случайно оказавшегося в поле измерений (например, от берега или подводной скалы). Поэтому к показаниям такого эхолота нужно было относиться с известной осторожностью.

Переход на ультразвуки позволил применить направленные звуковые пучки и тем самым получить сведения не только о расстоянии, на котором находится препятствие, но также и о направлении его местоположения. Такие ультразвуковые эхолоты работают уже гораздо надежнее, и их показаниям можно вполне доверять. Существуют и более универсальные приборы, позволяющие направлять звуковой луч не только вертикально вниз, но и под любым углом к горизонту. Подобного ро-

да приборы, получившие название гидроакустических локо-
ров, или просто гидролокаторов, имеют в настоящее время
очень широкое распространение. Гидролокатор, установленный
на корабле, может определять глубину моря (рис. 9,а), что
необходимо для целей навигации, предупреждать о приближе-
нии опасных айсбергов (рис. 9,б), обнаруживать подводные
лодки (рис. 9,в) и т. д.

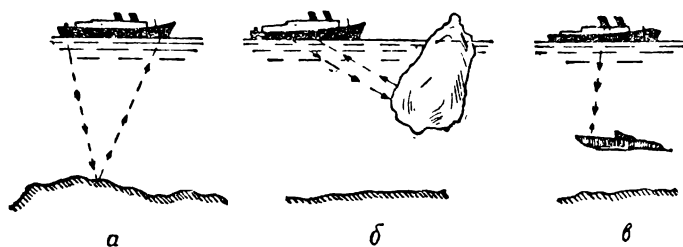


Рис. 9. Применение эхолота (гидролокатора):

а — для определения глубины моря; б — для обнаружения айсберга; в — для обнаружения подводной лодки.

Эхо в море наблюдается и от косяка рыбы. Это явление в настоящее время широко используется в промысловой рыбной разведке. На рис. 10 показаны образцы записей регистратора эхолота при прохождении кораблем рыбного района. Точки на всей поверхности рисунка представляют собой опорные данные. По горизонтали в известном масштабе откладывается ход

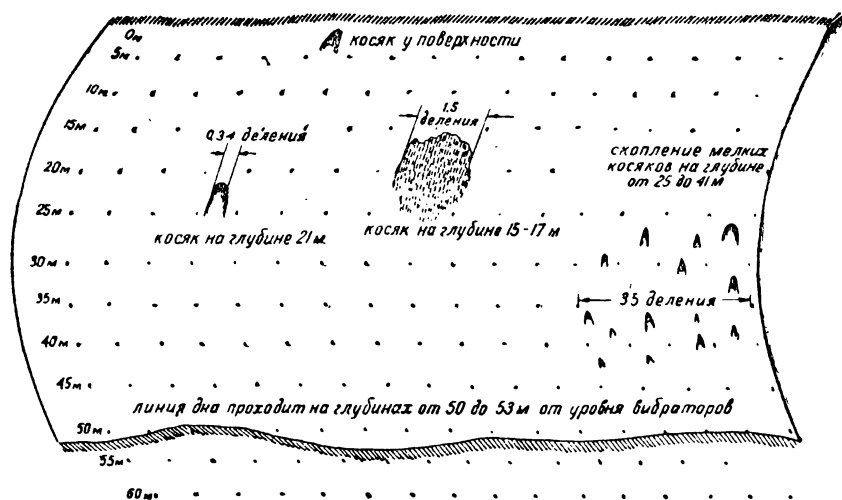


Рис. 10. Образцы записей эхолота при рыбной разведке (скорость судна — 5 миль в час; 1 деление по горизонтали соответствует 77 м).

корабля, причем, как это видно из рисунка, расстояние между двумя точками по горизонтали соответствует 77 м пройденного пути; 1 мм на ленте соответствует 6,2 м. По вертикали (точнее, по вертикальным дугам) откладывается глубина через каждые 5 м. Следует только помнить, что 0 м соответствует глубине погружения вибратора эхолота. Линия внизу рисунка — запись профиля морского дна; видно, что в данном районе глубина моря равна 50—53 м. Пятна на рисунке соответствуют обнаруженным косякам рыбы. Слева виден косяк длиной 25 м, находящийся на глубине 21 м, в центре — большой косяк длиной 115 м, находящийся на глубине около 15 м, и справа — несколько мелких косяков, отмечаемых на записи характерными значками, напоминающими «галочки».

Имея такую карту расположения косяков, разведывательное судно «наводит» рыболовецкие корабли на эти косяки, обеспечивая тем самым надежность лова при минимальной затрате времени на поиски рыбы.

Как это было недавно установлено, способность летучих мышей хорошо ориентироваться в темноте и летать, не задевая за препятствия, объясняется наличием в их организме органа, работающего по принципу ультразвукового локатора. Во время полета летучие мыши непрерывно излучают гортанную импульсы (от 5 до 60 в секунду) ультразвуковых частот и воспринимают ушами их эхо, т. е. их отражение от находящихся в непосредственной близости посторонних предметов.

Летучие мыши являются не единственными животными, применяющими ультразвуковую локацию для ориентации в полете. В 1954 году было установлено, что аналогичный локатор имеется у одного вида птиц, обитающих в темных пещерах в Латинской Америке. Птица эта была описана впервые 155 лет тому назад знаменитым естествоиспытателем А. Гумбольдтом,

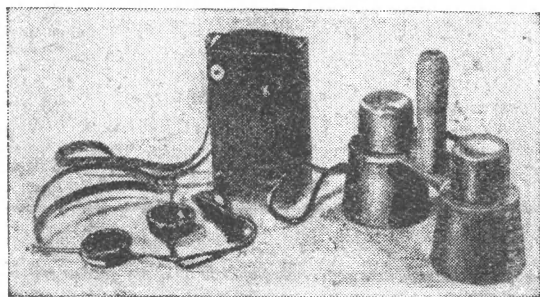


Рис. 11. Прибор для ориентации слепых.

обратившим внимание на то обстоятельство, что во время полета в пещере она пронзительно резко кричит. Туземцы назвали ее «гвачаро», что значит плачущая или жалующаяся. За-

писи крика этой птицы показали, что она действительно посылает короткие отрывистые импульсы, правда, не ультразвуковой частоты, а высокой звуковой — около 7 тыс. *гц*, и пользуется отражениями этих импульсов для определения препятствий, находящихся на пути ее полета.

В последнее время делаются попытки создания на этом же принципе миниатюрного локатора, позволяющего слепому ориентироваться относительно окружающих его препятствий. Внешний вид одного из опытных образцов такого прибора показан на рис. 11. Этот прибор состоит из ультразвукового излучателя и смонтированного с ним рядом ультразвукового приемника, переносимого в руке. Ящик с батареей носят на поясе или в кармане. Эхо-сигналы, отраженные от препятствий, воспринимаются при помощи телефона. Таким образом, слепой может обнаруживать препятствия, находящиеся на расстоянии до 10 м.

Выявление внутренних дефектов. Этот же принцип эхо с успехом используется для отыскания внутренних пороков (трещин, раковин и т. д.) в различных изделиях.

Для развития современной техники чрезвычайно существенное значение имеет прочность металлических изделий и деталей. Прочность металла может быть резко понижена из-за наличия мелкой, иногда неразличимой глазом трещинки, получившейся, например, при прокатке металла, либо раковины, образовавшейся во время отливки. Для обнаружения внутренних дефектов имеется много способов, но большинство из них страдает существенными недостатками. Одним из наиболее универсальных средств дефектоскопии является ультразвук, использование которого для этой цели было впервые предложено профессором С. Я. Соколовым еще в 1927 году. Своими дальнейшими работами советские ученые и инженеры С. Я. Соколов, А. С. Матвеев, В. С. Соколов, Д. С. Шрайбер и другие внесли существенный вклад в развитие и совершенствование методов ультразвуковой дефектоскопии.

Среди различных методов ультразвуковой дефектоскопии наиболее распространенным является уже известный нам метод обнаружения неоднородностей с использованием эхо-сигнала.

Распространение и отражение звуковых импульсов, например в какой-нибудь болванке, имеющей раковину внутри, происходят так же, как и при поисках айсбергов, но только масштаб явлений уменьшен во много раз. Схема работы ультразвукового дефектоскопа показана на рис. 12. К исследуемому телу, в данном случае к цилиндрическому стержню, плотно прижимаются две головки, одна из которых посылает ультразвуковой сигнал, а другая принимает его отражение (рис. 12,а). В случае отсутствия дефекта звуковой сигнал дойдет до про-

тивоположного края изделия и, вернувшись обратно, возбуждает электрический сигнал в приемной головке. Если же на пути сигнала встретится какая-нибудь неоднородность, например раковина или трещина, приемная головка воспримет сначала эхо, отраженное от этой неоднородности, а затем уже эхо от противоположной границы. Промежуточный эхо-сигнал будет свидетельствовать о наличии дефекта. На рис. 12,б показаны кривые, наблюдаемые на индикаторе дефектоскопа — на экране электронно-лучевой трубки. В верхней части рисунка пока-

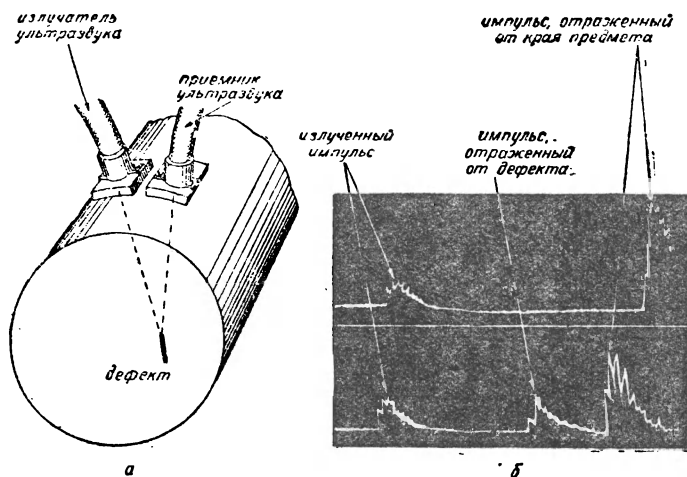


Рис. 12. Схема действия импульсного дефектоскопа:

а — расположение щупов; б — кривые, наблюдаемые на экране электронно-лучевой трубки (вверху — при отсутствии дефекта, внизу — при наличии дефекта).

зана кривая, получающаяся при отсутствии дефекта. Пик слева соответствует моменту посылки сигнала, пик справа — моменту прихода эхо. Расстояние между этими двумя пиками в определенном масштабе представляет собой размер исследуемого изделия в направлении ультразвукового луча. Кривая на рисунке внизу соответствует такому случаю, когда ультразвуковой луч встречается на своем пути дефект. Между двумя пиками, соответствующими переднему и заднему краю изделия, появляется третий пик, — в результате отражения звукового луча от внутреннего дефекта.

Чувствительность такого дефектоскопа и его «пробивная» способность чрезвычайно велики. Он может обнаружить раковинки размером в несколько миллиметров, залегающие в толще металла на глубине нескольких метров. Прибор имеет сравнительно небольшие размеры, портативен и питается от сети

переменного тока. Частота, на которой обычно работают такие дефектоскопы, лежит в пределах от 500 до 5 тыс. кГц.

Кроме импульсных дефектоскопов применяются и так называемые теневые дефектоскопы, т. е. такие, в которых о наличии или отсутствии дефекта можно судить по прохождению (а не по отражению) ультразвукового луча через обследуемую деталь. Теневые дефектоскопы обычно работают не в импульсном режиме, а в режиме непрерывного действия, что значительно упрощает их схему и устройство. Особенно широко они применяются для контроля расслоения в тонких листовых ма-

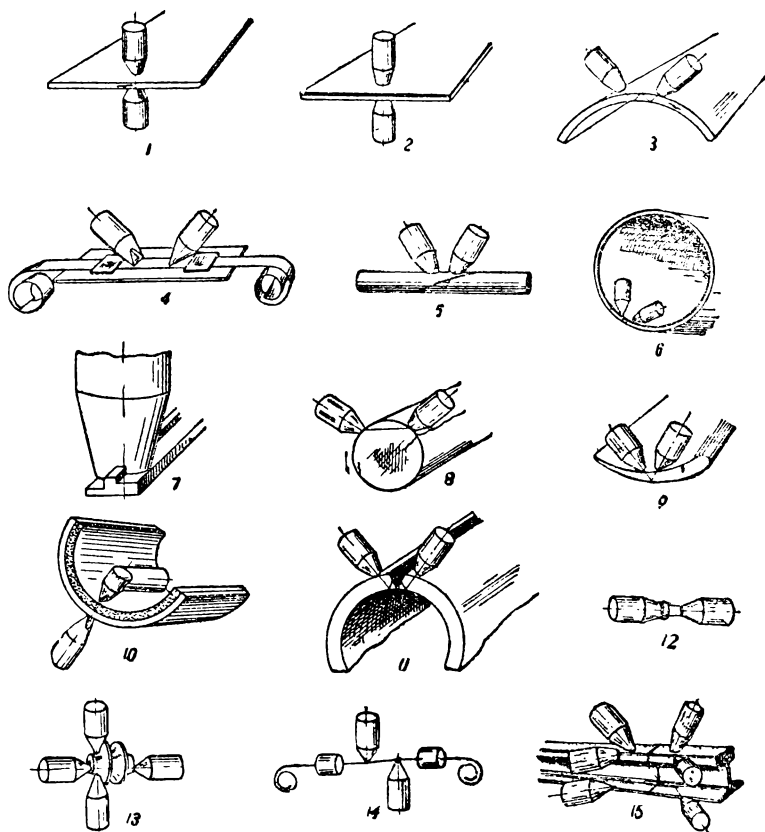


Рис. 13. Примеры применения теневого дефектоскопа для выявления:

1 — раздвоения в листах; 2 — нарушения качества покрытия; 3 — раздвоения и трещины в котлах и трубах; 4 — ликвации, текстуры в полосовых и листовых материалах; 5 — качества спая проводов; 6 — дефектов в хромовом покрытии цилиндров; 7 — точности профилирования; 8 — трещины и разрывов в стержнях; 9 — трещины в турбинных лопатках; 10 — однородности заливки вкладышей подшипников; 11 — качества сварных швов котлов и труб; 12 — качества применения покрытия контактов; 13 — трещины и раковины в изоляторах; 14 — трещины и разрывы проволоки; 15 — качества сварки рельсов.

териалах, для установления точности выполнения профилирования деталей, проверки качества сварных швов, качества заливки подшипников и т. д. На рис. 13 показаны примеры применения теневого дефектоскопа. Эти примеры, конечно, не исчерпывают всех возможных случаев использования теневых дефектоскопов.

Теневые дефектоскопы непрерывного действия нашли также широкое применение для контроля автомобильных шин, что позволяет надежно установить наличие расслоений между протектором и кордом и т. д. На рис. 14 приведена схема устройства и

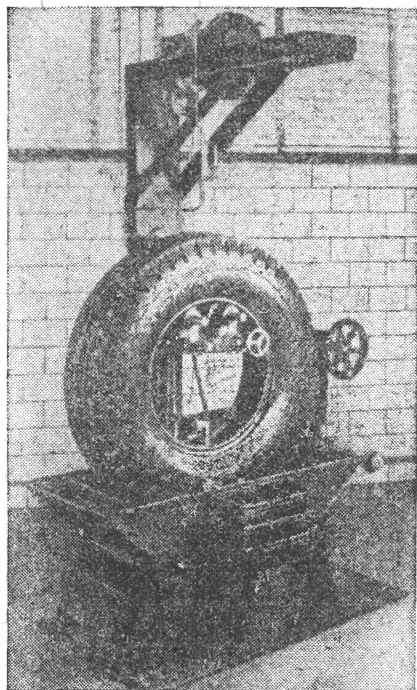
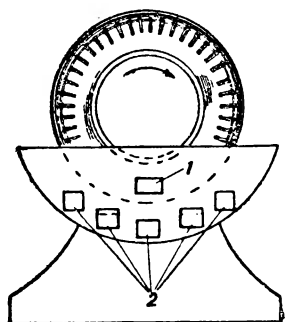


Рис. 14. Теневой дефектоскоп для контроля автопокрышек:

слева — схема действия (1 — излучатель; 2 — приемники);
справа — внешний вид.

внешний вид такого дефектоскопа. Обследуемая шина погружается в ванну с жидкостью, например с водой. Внутри шины помещается излучающая головка, снаружи — приемная (одна или несколько). Так как через границу раздела воды и резины звук проходит почти без отражений, то посланный излучателем сигнал практически полностью воспринимается приемником. Если во время вращения шины на пути звукового луча — между излучателем и приемником — окажется расслоение, т. е. полость, заполненная воздухом, то в силу большого отражения на границе резина — воздух эта полость окажется непрозрачной. Поэтому звуковой луч и сигнал, улавливаемые

приемником, заметно ослабятся. По степени ослабления можно судить как о наличии дефекта, так и его величине.

Аналогичный тип дефектоскопа может быть применен для контроля раковин и трещин в бетоне или железобетоне. Один из таких образцов разработан в Научно-исследовательском институте железобетона (Москва). Так как этот прибор предназначен для обнаружения дефекта порядка $8-10 \text{ см}^2$ и, следовательно, работает с широким лучом, в нем применена сравнительно низкая частота — 50 кгц . При такой частоте затухание ультразвука в бетоне невелико, и поэтому дефектоскоп может применяться для

контроля блоков больших размеров. Серьезным вопросом является осуществление хорошего контакта излучателя и приемника с шероховатой поверхностью бетона. Если просто прижать излучатель, то соприкосновение произойдет лишь в нескольких точках и количество переданной в бетон звуковой энергии будет очень мало. Для решения этой задачи излучатель и приемник помещают в мягкие резиновые

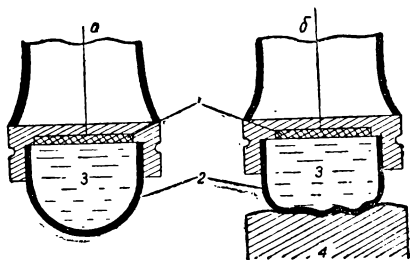


Рис. 15. Шупы дефектоскопа для работы на неровных поверхностях:

а — в свободном состоянии; б — в рабочем состоянии; 1 — кварцевая пластинка; 2 — резиновая оболочка; 3 — жидкость связи; 4 — обследуемое изделие.

«мешки», заполненные жидкостью (рис. 15). Как уже отмечалось выше, переход звуковых лучей из жидкости в резину происходит почти без всякого отражения, резиновая же мембрана плотно прилегает к поверхности бетона, покрывая все его неровности.

Измерение скорости потока. Ультразвук может быть с успехом применен для измерения скорости потоков жидкости и газа. Для этого в потоке помещают два ультразвуковых вибратора на некотором расстоянии друг от друга по направлению потока (рис. 16). Пошлем, например, первым вибратором короткий ультразвуковой импульс и, приняв его вторым вибратором, определим время t_1 , необходимое этому импульсу для прохождения расстояния l между вибраторами. Так как звук распространяется по направлению потока, то скорость его складывается из скорости звука c в данной среде и скорости потока v . Отсюда ясно, что измеренное время t_1 связано с приведенными выше величинами простым соотношением $t_1 = \frac{l}{c+v}$. Если теперь послать импульс вторым вибратором,

а принять первым, то скорость прохождения сигнала в этом случае будет равняться $c-v$, так как звук идет навстречу потоку и соответственно время t_2 прохождения второго импульса

будет $t_2 = \frac{l}{c-v}$. Измерив t_1 и t_2 и зная расстояние l , на котором расположены вибраторы, легко из приведенных двух уравнений определить искомую скорость потока v . Существенным является также то обстоятельство, что результат измерений не зависит от скорости звука c , которая может меняться в зависимости от температуры, состава жидкости или газа и других обстоятельств, не всегда поддающихся точному учету.

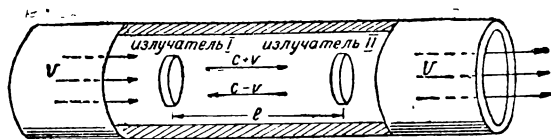


Рис. 16. Схема изучения скорости потока.

Описанный способ уже получил практическое применение, например, для определения расхода воды в камерах водяных турбин гидростанций.

Дробящее действие ультразвука. Огромное давление, которое развивается при захлопывании кавитационных пузырьков, может быть использовано для раздробления и размельчения различных веществ.

При крашении тканей существенное значение имеют размеры или, как говорят, дисперсность частиц пигмента красителя. Чем эти частицы меньше, тем ярче и насыщеннее получается цвет при меньшем расходе красителя. В Научно-исследовательском институте искусственного волокна были поставлены опыты с ультразвуковым измельчением кубового яркозеленого красителя «Ж», применяющегося для окраски вискозы. Размеры частичек обычного красителя колеблются в довольно широких пределах. Только 51,6% имеют размеры меньше микрона, а 30,2% имеют размеры больше 20 микрон. После же обработки такого красителя ультразвуком (облучение производилось на частоте 50 кГц) 90% всех частичек имели размер менее микрона и лишь 2% сохранили размер больше 20 микрон.

Таким образом, мы видим, что после обработки ультразвуком размеры частичек заметно уменьшаются и краситель делается более однородным по своей структуре. Об экономичности этого процесса можно судить по следующим данным эксперимента (постановка опыта не имела своей целью получение наибольшей экономичности): для обработки 2 л этого красителя требовалось 15-минутное облучение при звуковой мощности 150 вт.

Аналогичным образом можно измельчать порошки металлов, керамики, абразива и других материалов.

На дробящем действии звуков высокой частоты основано также ультразвуковое паяние алюминия. Как известно, алюминий с очень большим трудом поддается паянию обычными методами. Это происходит по той причине, что на воздухе алюминий, мгновенно окисляясь, покрывается химически очень стойкой пленкой окиси, которая препятствует смачиванию поверхности металла жидким припоем. Ультразвук дает возможность сорвать эту пленку и сделать поверхность алюминия доступной для припоя.

Схема действия такого паяльника показана на рис. 17. К задней стороне обычной головки паяльника 1, на которую

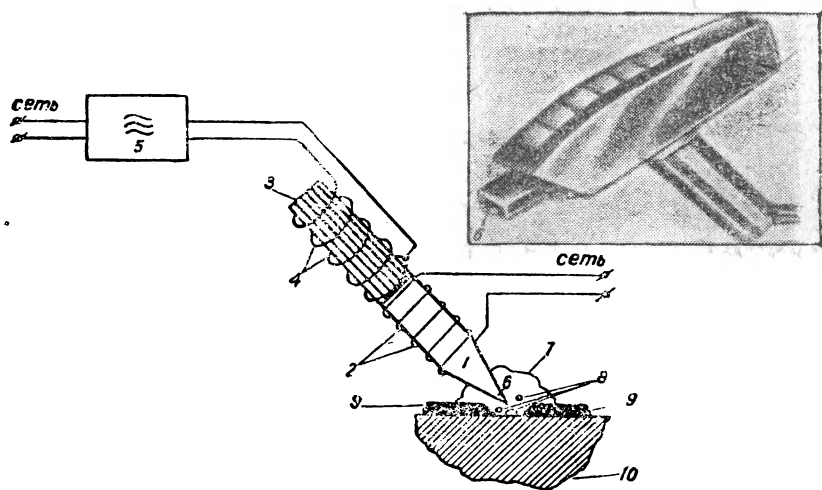


Рис. 17. Принцип действия ультразвукового паяльника:

1 — головка паяльника; 2 — нагревательная обмотка; 3 — магнитострикционный излучатель; 4 — возбуждающая обмотка; 5 — высокочастотный генератор; 6 — жало паяльника; 7 — припой; 8 — кавитационные пузырьки; 9 — пленка окислов; 10 — алюминий. Вверху справа — внешний вид паяльника.

наложена нагревательная обмотка 2, приставляется магнито-стрикционный излучатель 3. Этот излучатель представляет собой пакет никелевых пластин с обмоткой 4, которая питается от генератора ультразвуковой частоты 5. Частоты применяемого ультразвука лежат в пределах 20—30 кГц. Генерируемые этим пакетом ультразвуковые колебания распространяются по головке паяльника и доходят до ее жала 6, погруженного в капельку расплавленного припоя 7. Под действием ультразвука в припоее возникают кавитационные пузырьки 8. Развивающееся при их захлопывании давление разрушает пленку окиси 9 и обнажает чистую поверхность алюминиевой пластины 10, которая смачивается припоем. Количество энергии, необходимой для создания ультразвука в таком паяльнике, не

превышает количества энергии, расходуемой на его нагрев, и, таким образом, стоимость паяния алюминия лишь немного превышает стоимость паяния других металлов. Удобства же, получающиеся от возможности паять алюминиевые изделия и детали, чрезвычайно велики.

Аналогичным образом можно лудить алюминий. Для этого в лудильной ванне, в которой находится расплавленный припой, возбуждаются ультразвуковые колебания. В расплавленном припое возникает кавитация, которая сбивает пленку окисла с погруженной в ванну детали;

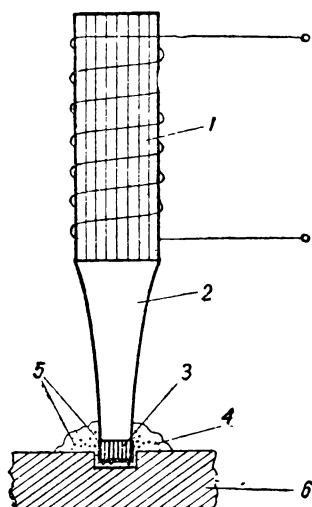


Рис. 18. Принцип ультразвукового метода обработки хрупких материалов:

1 — вибратор; 2 — концентратор; 3 — долото; 4 — эмульсия; 5 — частицы абразива; 6 — обрабатываемый материал.

очищенная таким образом поверхность алюминия входит в соприкосновение с расплавленным припоем и облуживается. Такую луженую деталь можно дальше паять обычным паяльником. Для лужения наиболее подходящей также является частота 20—30 кГц. Это обстоятельство, а также тот факт, что при паянии развиваются сравнительно высокие температуры, объясняют, почему в качестве вибраторов в паяльниках и лудильных ваннах чаще всего применяются магнитострикционные излучатели.

Таким же образом можно паять и лудить нержавеющую сталь, вольфрам и другие металлы.

Чрезвычайно интересным применением ультразвука, уже получившим распространение в промышленности, является обработка таких хрупких твердых материалов, как, например, стекло, фарфор, керамика. При этом процесс обработки в известной степени напоминает действие отбойного молотка. К магнитострикционному излучателю (рис. 18) через специальный суживающийся концентратор ультразвука приставляется миниатюрное долото (пуансон) с профилем, соответствующим профилю того отверстия, которое нужно получить. Обрабатываемая поверхность материала смачивается эмульсией абразивного порошка в воде или в масле. Когда торец долота подводится к обрабатываемой поверхности, находящиеся между ним и поверхностью частицы абразива с силой ударяют в обрабатываемый материал и выкалывают из него миниатюрные пылинки. Так как частиц абразива много, а частота ударов соответствует частоте ультразвука (20—25 кГц), то, несмотря на очень маленькие размеры выкалываемых частиц,

процесс в общем идет довольно быстро. Так, например, в стекле квадратное отверстие размером 6×6 мм и глубиной 6 мм может быть сделано приблизительно за минуту. Способ этот удобен также и тем, что позволяет получать отверстия любого, даже самого сложного профиля.

Перечень материалов, которые могут быть обработаны при помощи ультразвука, кроме названных, включает также драго-

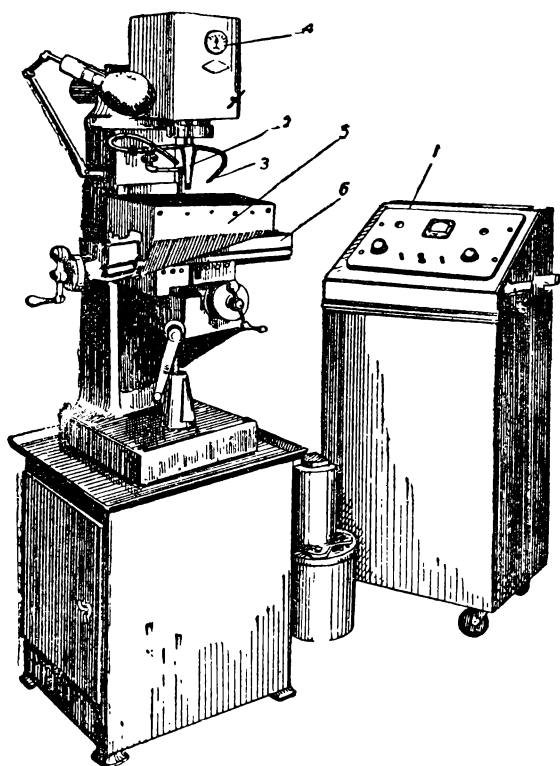


Рис. 19. Внешний вид машины для ультразвуковой обработки хрупких материалов:

1 — высокочастотный генератор; 2 — концентратор и долото; 3 — трубки для подачи эмульсии с абразивом; 4 — динамометр; 5 — ванна, в которой ведется обработка; 6 — стол с механизмом подачи.

ценные камни, кварц, сверхтвердые сплавы, минерало-керамические резцы, карбид вольфрама, т. е. материалы, обладающие большой ударной хрупкостью. Вязкие материалы не могут быть обработаны этим способом.

В качестве абразива используется корунд или карбид бора. При применении абразива более крупного размера процесс идет

быстрее; с мелким абразивом скорость обработки падает, зато улучшается чистота (при применении тонкого абразива в 600 меш среднеквадратичная неровность получается 0,25 микрона). Выпускаемые в настоящее время машины (рис. 19) работают на частоте 25 кГц с амплитудой колебания пуансона 10—100 микрон, для чего необходим вибратор мощностью в 150 вт. Высокочастотный электрический генератор потребляет от сети 1 кВт и имеет выходную мощность до 400 вт.

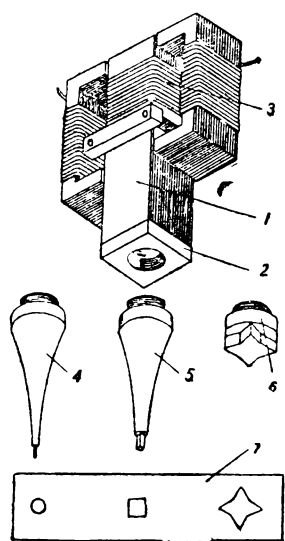


Рис. 20. Вибратор с набором долот и образцы фигурных отверстий:

1 — вибратор; 2 — гайка для крепления долота; 3 — обмотка вибратора; 4, 5 и 6 — долота различных форм; 7 — отверстия в материале.

Для уменьшения срабатывания долота его нужно делать из мягкого материала, например из монеля, нержавеющей стали или холоднокатаной незакаленной инструментальной стали. На рис. 20 показаны образцы долот различной формы и соответствующие им отверстия в материале.

Наиболее эффективным является применение этого метода обработки для придания необходимой геометрии режущему инструменту из сверхтвердых сплавов и керамики, для обработки и сверления отверстий в рубинах, сапфирах и агатах, являющихся подшипниками часовых и других механизмов, для изготовления фильер (особенно фасонных) из твердых камней или карбида вольфрама, для изготовления очень точных миниатюрных изоляторов (для электровакуумных приборов).

Интересно отметить, что, несмотря на сравнительно широкое распространение этого нового производственного процесса, физика его до сих пор не ясна, в частности, неизвестен механизм, в результате которого частички абразива получают столь значительное ускорение.

Большим преимуществом этого метода является также то обстоятельство, что в отличие от всех существующих методов обработки металлов (кроме электроэрозионного) при нем материал не подвергается ни механическим усилиям, ни температурным деформациям и поэтому полностью сохраняет свою первоначальную структуру.

В самое последнее время были изготовлены зубоорудья, работающие на описанном принципе. Опыт показал, что они хорошо и быстро обрабатывают зубную эмаль и значительно менее болезненно, чем это делается при помощи обычных бормашинок. Если такой ультразвуковой бор случайно

дойдет до мягкой ткани, например до поверхности десны, то в силу самого принципа сверления процесс автоматически остановится.

Ультразвуковая очистка. При помощи ультразвука можно удалять не только окисную пленку с поверхности алюминия, но и любую другую поверхностную пленку, покрывающую тот или иной материал. Другими словами, ультразвук может быть применен для очистки поверхностей. Особенно существенное значение этот процесс приобретает в применении к небольшим деталям сложной конфигурации, очистка которых другими способами весьма затруднена, а иногда и просто невозможна. В качестве примера можно привести детали часовых механизмов — шестеренки, трибки, и особенно камни (подшипники), отверстия в которых имеют диаметр 0,08 мм. Хорошая очистка часовых деталей имеет не меньшее значение, чем точность их изготовления. Так как моменты сил, действующих в ручных часах, очень незначительны (порядка 0,1 г.мм), то мельчайшая пылинка может повлиять на точность хода или даже привести к остановке часов.

Очистка деталей часов является чрезвычайно трудоемкой ручной операцией. Применение ультразвука позволяет механизировать эту сложную операцию, перевести детали на массовую обработку и довести их очистку до нужной степени. Швейцарская фирма «Грюен», выпускающая до 2 тыс. часов в день, с 1950 года полностью перешла на ультразвуковую очистку. В установках этой фирмы процесс очистки ведется на частоте 300 кГц при интенсивности около 5 Вт/см². Кварцевая пластина излучает ультразвук в масло, которое охлаждается змеевиком с проточной водой до температуры 50°, являющейся оптимальной. Над кварцевой пластиной помещается сосуд с дном из тонкой, прозрачной для ультразвука серебряной фольгой, в который загружаются детали, подлежащие очистке. В качестве моющей жидкости, заливаемой в сосуд, применяют спирт, очищенный бензин или трихлорэтилен. Просушивание чистых деталей производится инфракрасными лучами.

Разработанный фирмой «Детрекс» в США процесс очистки осуществляется несколько иначе. Ультразвуковые колебания создаются излучателями из титаната бария, представляющими собой цилиндрические сегменты длиной 6 дюймов и шириной 2 дюйма. Такая форма обеспечивает достаточную концентрацию ультразвука в области оси цилиндрической поверхности. Именно в этой области находятся движущиеся на конвейере детали, подлежащие очистке. На питание четырех излучателей, поставленных друг за другом, расходуется около 2 кВт высокочастотной мощности. Процесс протекает при температуре примерно 60°. Скорость прохождения детали около 30 см/мин.

По сравнению с ручным процессом ультразвуковая установка повышает качество очистки, экономит рабочую силу, на

50% снижает себестоимость и освобождает две трети производственной площади.

Проведенные анализы показывают, что количество остающегося жира при применении комбинированного метода очистки (растворитель и ультразвук) в 10 раз меньше, чем при очистке только горячим растворителем.

Важной областью применения ультразвука является также очистка деталей электровакуумных приборов. На рис. 21 показаны результаты ультразвуковой очистки внутренней поверхности никелевых трубочек катодов электронных ламп при помощи установки, разработанной одним из научно-исследовательских институтов Министерства радиотехнической промыш-

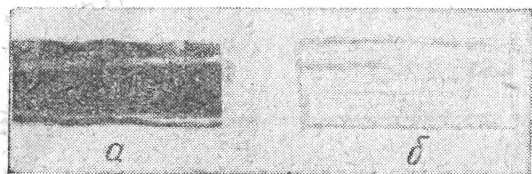


Рис 21. Образцы никелевых трубочек:

а — до очистки; б — после очистки ультразвуком.

ленности. Вследствие малых размеров (диаметр 1—3 мм) очистка внутренней поверхности, проводившаяся вручную, была очень трудоемкой операцией, тормозившей нормальный ход производственного цикла. Теперь трубочки, подлежащие очистке, набираются в пакеты по несколько сотен штук и опускаются на три минуты в растворитель, облучаемый низкочастотными ультразвуковыми колебаниями. Производительность такой установки весьма велика, и поэтому ее применение позволило ликвидировать одно из узких мест производства.

Однако вследствие высокой стоимости ультразвука он не может быть пока применен для очистки поверхностей большого размера.

Получение эмульсий. Дробящее действие ультразвук оказывает не только на твердые тела, находящиеся в жидкости, но и на несмешивающиеся между собой жидкости. Известно, например, что если налить ртуть и воду в один сосуд, то между ними будет существовать резкая граница раздела, так же как между водой и маслом. Воздействуя на эту смесь ультразвуком, можно разбить жидкость на мельчайшие капли и образовать взвесь капелек одной жидкости в другой. Такие взвеси несмешивающихся жидкостей носят название эмульсий и широко применяются в разнообразных отраслях техники.

Облучение ультразвуком — одно из лучших средств для приготовления эмульсий. Капельки получаются при этом очень

мелкими и одного размера. Эмульсия вследствие этого становится очень устойчивой и может сохраняться в течение долгого времени.

Для получения эмульсии ультразвуковым способом очень удобно применять уже описанный выше жидкостный свисток. В ванну, в которой изготавливается эмульсия, наливают одну из жидкостей, а другую, эмульсию которой хотят получить, прогоняют под давлением через свисток. При этом создаются особые благоприятные условия, и процесс образования эмульсии идет очень быстро. Например, получение 50 л эмульсии масла в воде занимает меньше одной минуты.

Получение ультразвуковых эмульсий — один из первых процессов, который сразу завоевал прочное место в промышленности.

Кроме изготовления обычных эмульсий, например масла в воде, имеются сведения, что в Швеции ультразвуковые методы применяются для получения эмульсии какао при изготовлении шоколада, а в Японии на основе эмульсий, полученных при помощи ультразвука, изготавливается в большом количестве высококачественный сапожный крем.

Ускорение диффузионных процессов. Как было выяснено экспериментально, наличие ультразвуковых колебаний ускоряет диффузионные процессы, которые широко используются в химической технологии. Так, например, процесс дубления кожи, цель которого состоит в том, чтобы дубящий раствор полностью пропитал погруженную в него кожу, чрезвычайно длителен; для определенного сорта кожи он продолжается 120 часов. На рис. 22 показаны микрофотографии среза кожи, сделанные через 16 часов после начала процесса (по

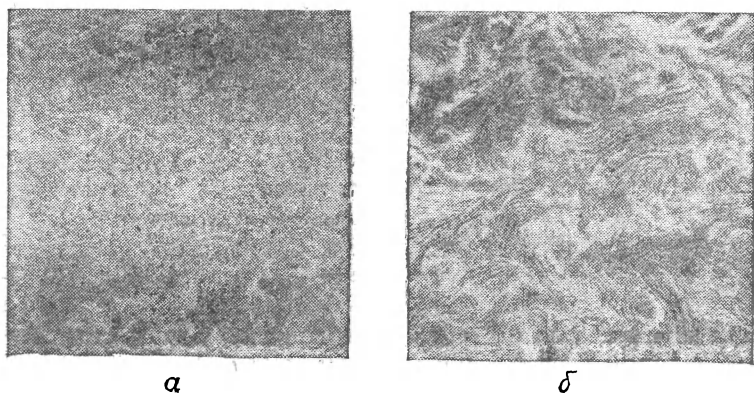


Рис. 22. Микрофотографии среза кожи после 16 часов дубления:

а — в обычных условиях (в середине виден более светлый непроду-
бившийся слой); б — при облучении ультразвуком.

материалам Научно-исследовательского института меховой промышленности). Видно, что кожа, подвергавшаяся дублению обычным способом (рис. 22,а), продубилась только в поверхностном слое (сверху и снизу), а средняя часть осталась без изменений. На рис. 22,б — снимок кожи, обрабатывавшейся с применением ультразвука; она продублена полностью. В данном случае производственный процесс может быть ускорен, по крайней мере, в 8 раз.

Ускоряются также и другие аналогичные процессы, как, например, дубление овчины, обезволаживание кожи.

Ускорение диффузионных процессов приводит и к интенсификации окрашивания. Под действием ультразвука краситель глубже проникает в ткань и прочнее на нее садится. В настоящее время ультразвук применяется при окраске некоторых видов искусственного волокна, которое в обычных условиях чрезвычайно трудно поддается окраске.

Под действием ультразвука ускоряется также процесс мойки ткани. Здесь, повидимому, наряду с ускорением диффузионных процессов существенную роль играет и механическое воздействие, вызываемое кавитацией. На рис. 23 показаны три образца ткани, загрязненной стандартной смесью сажи, жира и других веществ. Два образца подвергались затем очистке: один (рис. 23,б) кипячению в течение 3 часов в моющем растворе мыла и соды, а другой (рис. 23,в) — облучению ультразвуком в таком же моющем растворе в течение 10 минут. Ясно видны преимущества ультразвуковой мойки. Здесь следует, однако, указать, что ввиду дороговизны ультразвуковой энергии вопрос о рентабельности применения ультразвуковой мойки не может быть пока решен однозначно. Экономическую сторону нужно изучать применительно к конкретным условиям того или иного производства.

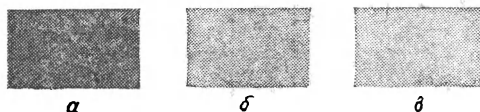


Рис. 23 Образцы тканей:

а — до очистки; б — после кипячения в моющем растворе в течение 3 часов; в — после воздействия ультразвука в моющем растворе в течение 10 минут.

Очистка газов и жидкостей. Очень мелкие частицы твердых веществ, находящиеся в газообразной среде, не оседают вследствие своей легкости, а держатся в течение продолжительного времени во взвешенном состоянии, образуя так называемые аэрозоли. Чем меньше частицы, образующие аэрозоль, тем больше он может существовать. Примером аэрозоля

может служить дым, состоящий, как известно, из твердых негоревших частиц. Оказывается, что под действием ультразвука мельчайшие частицы, образующие аэрозоль, сближаются одна с другой, слипаются в более крупные комки, или, как их называют, агрегаты, и могут быть уловлены известными способами. Несмотря на то, что механизм этого интересного явления нельзя считать выясненным, уже известны многие случаи применения ультразвука для очистки дыма промышленных предприятий.

На рис. 24 показаны увеличенные фотографии дыма: слева — до воздействия ультразвука, справа — после. Видно, насколько укрупнились твердые частицы и насколько очистилось

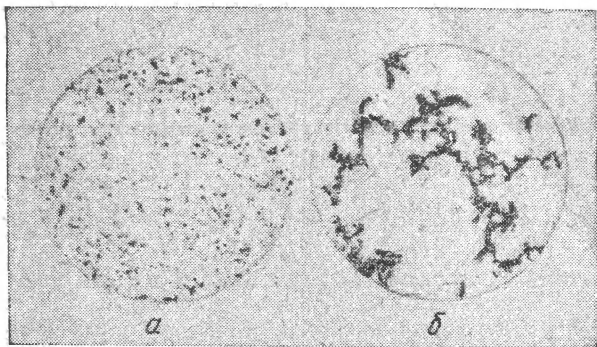


Рис. 24. Микрофотографии дыма:

а—до облучения ультразвуком; б—после облучения.

все остальное поле. Значение применения ультразвука для этой цели очень велико. Дым промышленных предприятий загрязняет атмосферу, не говоря уже о том, что в ряде случаев твердые частицы, взвешенные в дыме, содержат много полезных и нужных для производства продуктов, которые в буквальном смысле этого слова «вылетают в трубу». Для очистки дыма чаще всего пользуются ультразвуковыми сиренами, устанавливаемыми на выходе дымовых труб. Выпадающие при этом твердые частицы попадают в специальную ловушку.

Под действием ультразвука слипаются не только частички аэрозолей, но и пузырьки газа, находящиеся в жидкостях. Наличие таких пузырьков бывает очень нежелательным в целом ряде производственных процессов. Например, пузырьки, образовавшиеся во время варки стекла и застрявшие в стекломассе, делают стекло в ряде случаев непригодным для применения. Пузырьки, образующиеся в расплавленных металлах и оставшиеся в затвердевших отливках, ослабляют прочность этих отливок. Воздействие ультразвука на расплавленную стекломассу или на расплавленный металл приводит к образова-

нию пузырьков большего размера (в результате их слипания), которые легче выходят из жидкости, и, таким образом, расплав обезгаживается.

При осуществлении этого метода возникают трудности, связанные с необходимостью передачи ультразвука в расплав, обладающий высокой температурой. Так как пока еще не найдено удовлетворительных способов преодоления этих трудностей, то ультразвуковое обезгаживание не получило широкого распространения.

Имеются указания, что оптическая фирма «Цейс» разработала и применяет в своем производстве ультразвуковые методы обезгаживания оптического стекла в процессе его варки.

* * *

Каковы же реальные перспективы широкого применения ультразвука в настоящее время?

Стоимость ультразвуковой энергии, простота и надежность генераторов ультразвука и их эксплуатационные качества существенно зависят от типа генераторов. Наилучшими в этом отношении являются генераторы механические — жидкостный свисток и воздушная сирена. Однако применение этих генераторов ограничивается их основными параметрами — частотой генерируемого звука и его мощностью. Жидкостный свисток, как известно, дает несколько десятков ватт в диапазоне от 4 до 30 тыс. *гц* и поэтому мог бы применяться для всех процессов, идущих в данной области частот, но малая его мощность не позволяет развить достаточную производительность. В силу этого он больше всего применяется для изготовления эмульсий по такой схеме, когда свисток помещают в одну из компонент эмульсии, а возбуждается он жидкостью, являющейся второй компонентой. При такой схеме процесса ультразвуковая система работает просто, надежно и производительно. Этим и объясняется то обстоятельство, что применение ультразвуков для изготовления эмульсий получило широкое распространение.

В силу аналогичных соображений таким же широко внедренным и оправдавшим себя методом является очистка дымов (коагуляция аэрозолей), осуществляемая при помощи ультразвуковых сирен. Повидимому, весьма перспективным является применение ультразвуковых сирен для осаждения тумана, например на посадочных дорожках аэродрома.

До сих пор в нашем распоряжении нет генератора такого же простого и мощного, как сирена, но позволяющего возбудить ультразвуковые колебания в жидкости. Поэтому приходится пользоваться сравнительно дорогими и сложными электромеханическими излучателями. Применение ультразвука в этих случаях не всегда оказывается экономически оправдан-

ным, даже если производимый им эффект представляет существенный интерес. Бесспорными являются те применения, при которых мы имеем дело с небольшими количествами сравнительно дорогостоящих материалов (например, диспергирование красителей, ускорение диффузных процессов и т. д.), либо с обработкой трудоемких деталей небольших размеров и сложных форм (очистка деталей часов, сверление миниатюрных изоляторов, сверление и обработка драгоценных камней, заточка режущего инструмента сложных форм). В остальных случаях для суждения о практической применимости ультразвука нужны дополнительные специальные технико-экономические исследования.

Как можно представить себе дальнейшее развитие работ по промышленному применению ультразвука?

Здесь нужно отметить следующие три основные направления: разработка новых дешевых и простых методов получения ультразвука в жидкостях; исследование и изучение механизма воздействия ультразвука на вещество; изыскание новых возможностей применения ультразвука. Первое направление ясно и не требует специальных комментариев. Необходимость проведения работ по изучению механизма воздействия ультразвука вызывается тем, что техника обогнала в этой области науку и в ряде случаев, когда ультразвук уже широко применяется, механизм его действия остается для нас неясным. Поэтому мы никогда не можем быть до конца уверены в правильности выбранных режимов. Раскрытие всех деталей механизма воздействия ультразвука может дать сведения, которые позволят существенно повысить эффективность его применения.

Наряду с изысканием новых применений все время идет расширение уже известных. Так, например, в последнее время известное свойство ультразвука ускорять диффузионные процессы было использовано для пропитки тканей в кабельном производстве, для ускорения пропитки посевного материала бактерицидными и фунгисидными растворами. Другим примером расширения известной области является разработка ультразвуковой зубной бормашины. По данным американской печати, в 1954 году была выпущена пробная серия таких машин в количестве 100 экземпляров, а в 1955 году предполагается изготовить 1000 штук.

Успешное проведение работ по всем перечисленным направлениям требует широкого фронта совместных действий физиков, химиков, биологов, технологов, конструкторов и производителей. Кроме того, быстрое развитие этих работ упирается в необходимость выпуска специализированной ультразвуковой аппаратуры как контрольно-измерительного типа, так и промышленной. Положение, при котором желающие работать в области ультразвука должны сами для себя изготавливать необходимую аппаратуру, положение, которое можно было

считать естественным и нормальным во время первого этапа изучения ультразвука и возможностей его технического применения, в настоящее время может явиться тормозом для дальнейшего развития. Насколько это соображение является существенным, можно судить по опыту США, где, по данным журнала «Электроникс», только по трем видам промышленного применения ультразвука (сверление, очистка и паяние) в 1954 году 18 фирм, изготавливающих 26 типов ультразвуковых установок, продали оборудования на сумму в четыре раза большую, чем в 1953 году.

Для внедрения прогрессивных ультразвуковых методов в технику наряду с работой ученых и инженеров, разрабатывающих и изучающих возможности применения ультразвука в различных областях народного хозяйства, необходим также и вклад со стороны промышленности, выражающийся в освоении и серийном выпуске ультразвуковых лабораторных и промышленных установок.

Нет сомнения, что наша промышленность и научно-исследовательские учреждения в ближайшее время справятся с данными задачами. Это позволит широко внедрить передовые ультразвуковые методы и тем самым повысить производительность труда и качество вырабатываемых изделий в различных областях народного хозяйства Советского Союза.

ЛИТЕРАТУРА

Гуревич П. Я., Емельянов Н. Я., Шевченко Ю. Г., Юдович Ю. Б. Применение гидроакустики на рыболовных судах. Приморское книжное издательство. 1955.

Красильников В. А. Звуковые волны в воздухе, воде и твердых телах. Гостехтеоретиздат. 1954.

Кудрявцев Б. Б. О неслышимых звуках. «Молодая гвардия». 1953.

Кудрявцев Б. Б. Простые опыты с ультразвуками. Учпедгиз. 1954.

Писаревский М. М. Ультразвуковой способ долбления твердых материалов «Станки и инструменты» № 5 1954

Розенберг Л. Д. Ультразвуки и их применение. Изд. «Знание». 1954.

В ИЗДАТЕЛЬСТВЕ «ЗНАНИЕ»

ВЫШЛИ В СВЕТ

СЛЕДУЮЩИЕ БРОШЮРЫ-ЛЕКЦИИ:

ЖДАНОВ Г. Б. Космические лучи на службе современной науки.

ЖИМЕРИН Д. Г. Электрификация народного хозяйства Советского Союза.

ЛОЗИНСКИЙ М. Г. Промышленное применение нагрева токами высокой частоты.

ЦАРЕГОРОДЦЕВ В. Е. Передовые методы труда на железнодорожном транспорте.

СОКОЛОВ Е. Я. Развитие теплофикации в СССР.

ГРИШИН М. М. Развитие советской гидротехники и гидротехнического строительства.

СТЫРИКОВИЧ М. А. Успехи и перспективы развития советского котлостроения.

ДМИТРИЕВ И. И. Современное строительство гидроэлектростанций.

ПОМУС М. И. Западная Сибирь.

БАРАНОВ П. А. Происхождение и развитие растительного мира.

КУЛЬТИАСОВ М. В. Природные растительные богатства СССР и их народнохозяйственное значение.

Указанные брошюры можно приобрести в магазинах книготоргов, в газетных киосках «Союзпечать», в районных отделениях и агентствах связи.

ГЛАВКНИГОТОРГ