

УЛЬТРААКУСТИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ

Н. Н. Малов, Москва

Ультраакустические колебания, т. е. колебания, имеющие частоту порядка десятков тысяч герц и выше, получаемые по преимуществу электромеханическим путем (обычно при помощи пьезоэлектрического кварца), за последние годы привлекли внимание целого ряда исследователей; в результате их работ накопился разнообразный весьма интересный материал, обзору которого и посвящается настоящая статья^{1, 2, 3, 4}.

1. Методы получения ультразвуковых колебаний

Вместо чисто механических методов (возбуждение стержня ударом, свисток Гальтона и т. д.), позволяющих получить лишь ультразвуковые колебания ничтожной мощности с быстро уменьшающейся амплитудой, для получения устойчивых колебаний применяются электромеханические методы, которые могут быть разбиты на три основных группы:

а) Пьезоэлектрические осцилляторы. При создании переменного электрического поля в пьезоэлектрической пластине (кварц, турмалин, сегнетова соль) она приходит в механические колебания с частотой, соответствующей частоте поля. При электро-механическом резонансе амплитуда колебаний резко возрастает. Это явление, обнаруженное уже довольно давно, оказалось весьма ценным для радиотехники, так как выяснилось, что пьезоэлектрический кристалл, колеблющийся в контуре лампового генератора, проявляет тенденцию стабилизировать его частоту, поддерживая ее равной собственной частоте кристалла с весьма высокой точностью. В последнее время эта кварцевая стабилизация распространилась чрезвычайно широко.*

Преимущественное применение имеют кварцевые осцилляторы, являющиеся достаточно прочными и доступными по цене. Собственные частоты кварцевых пластин лежат в интервале от сотен тысяч до немногих миллионов герц. Для более низких частот нужны слишком толстые пластины, которые трудно изготовить из добываемых кристаллов кварца; при повышении частоты пластины делаются слишком тонкими и хрупкими. Без особых затруднений удается получать менее интенсивные колебания, возбуждая кварц

* О практическом использовании пьезоэлектрических колебаний см. в статье П. Н. Беликова, Успехи физич. наук VIII, 222, 1928.

не на основном тоне, но на одном из его обертонов. Например, Бергманну⁵ удалось доказать наличие всех нечетных обертонов кварцевой пластинки до 69-го включительно.

Кристаллы сегнетовой соли более хрупки, чем кварцевые; они не получили широкого распространения. В последнее время появились турмалиновые пластинки, также пригодные для получения ультразвуковых колебаний. По исследованиям Джеральда, Фукса и Ундервуда⁶, резонансная частота турмалиновой пластинки толщиной l мм, колеблющейся в толщину, составляет

$$f_t = \frac{3,77 \cdot 10^6}{l} \text{ герц,}$$

т. е. превышает соответствующую частоту для кварца

$$f_q = \frac{2,73 \cdot 10^6}{l} \text{ герц.}$$

Кроме того, для работы с турмалином можно пользоваться меньшими анодными напряжениями, благодаря чему уменьшается возможность пробоя пластинки. Авторы считают, что турмалиновые пластинки могут быть использованы для стабилизации коротковолновых передатчиков. Температурный коэффициент (т. е. изменение собственной частоты с температурой) для турмалина определяется соотношением

$$\frac{\Delta f}{f t^\circ} = 3,6 \cdot 10^{-5},$$

т. е. близок к температурному коэффициенту кварца ($2-5 \cdot 10^{-5}$).

Для получения мощных ультразвуковых колебаний, вызывающих целый ряд весьма интересных эффектов, приходится значительно повышать напряжение, подаваемое на осциллятор. Во избежание перекрытия его по поверхности, осциллятор помещают в трансформаторное масло или другую жидкость. При этом улучшится и отдача ультразвуковой энергии, так как акустические сопротивления кварца и жидкости значительно более близки друг к другу, чем кварца и воздуха.

Интенсивность колебаний, излучающихся кварцем, сильно зависит от способа прикрепления электрода к поверхности кварца⁷. Видимо, наиболее надежным способом является покрытие поверхности кварца металлическим слоем (например, путем катодного распыления). При мощных колебаниях поверхность электрода постепенно разрушается. Интенсивные колебания могут быть получены только от монокристаллических пластинок. Так как эти пластинки обычно имеют незначительные размеры, а излучаемая мощность растет с увеличением поверхности осциллятора, то приходится прибегать к мозаичным излучателям, впервые примененных Ланжевром⁸ для подводной сигнализации.

Вуд и Лумис⁹, пользуясь напряжениями до 50 kV, впервые исследовали явления, происходящие в поле мощных ультразвуковых колебаний; к этим явлениям мы вернемся в конце обзора.

б) Магнитострикционные осцилляторы. Магнитострикционные колебания ферромагнитных стержней легко получаются при помещении стержня в катушку колебательного контура генератора незатухающих колебаний¹⁰, либо в катушку, индуктивно связанную с контуром. Если изменять частоту контура, то при совпадении ее с собственной частотой стержня амплитуда его колебаний резко возрастает. Это возрастание амплитуды хорошо видно на рис. 1, представляющем осциллограмму колебаний, полученную при помощи зеркала, укрепленного на оси, зажатой между колеблющимся стержнем и упругим валиком. Колебания зеркала, вызывали смещение светового зайчика в вертикальном направлении. осциллографическая лента двигалась в горизонтальном направлении и причем ее смещение было связано с изменением частоты генератора;

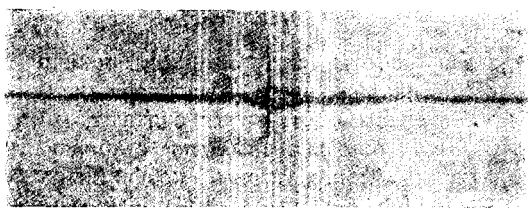


Рис. 1. Возрастание амплитуды колебаний стрикцирующего стержня при резонансе.

Стержень может возбуждаться как на основном тоне, так и на обертонах¹¹. Так как собственная частота закрепленного по середине ферромагнитного стержня длины l см составляет приблизительно

$$f = \frac{2,5 \cdot 10^5}{l} \text{ герц,}$$

то, очевидно, этот метод весьма пригоден для получения колебаний с частотами порядка тысяч и десятков тысяч герц.

Изучая магнитострикционные колебания, Пирс¹² обнаружил, что стрикцирующий стержень, будучи помещен надлежащим образом в катушки генератора незатухающих колебаний, способен стабилизировать частоту генератора. Одна из возможных схем изображена на рис. 2. Катушки L_1 и L_2 создают поля одинакового направления. Колебания возникают лишь при близком совпадении периодов контура и стержня и приобретают частоту, равную собственной частоте стержня. Эта частота сохраняется стабильной при небольших изменениях емкости контура; при сильной же расстройке колебания срываются. Теоретическое рассмотрение условий магнитострикционной стабилизации было сделано Блэком¹³ и Фрейманом¹⁴. Кроме того, магнитострикционными колебаниями занимался Копилович¹⁵.

Путем подбора соответствующих материалов Пирсу удалось получить магнитострикционный осциллятор с температурным коэффициентом, равным $2 \cdot 10^{-5}$, т. е. близким к коэффициенту кварца

и турмалина. Несколько усложняя форму осциллятора, Пирс смог получить собственную частоту $f = 1000$ герц при длине стержня всего 94 см. Таким образом получение акустических частот возможно со стержнями приемлемой длины.

Для получения ультразвуковых колебаний можно пользоваться прямыми стержнями. При $l = 2$ см получится около 125 тысяч герц. Дальнейшее укорочение стержня (а с ним и катушек) затруднительно. Однако и здесь Пирсу удалось пойти дальше. При помощи осциллятора с периодически меняющимся сечением, имевшего в длину несколько сантиметров, Пирс получил частоту $f = 295$ тыс. герц. Для получения мощных ультразвуковых колебаний наиболее пригодны никелевые стержни, так как у никеля коэффициент стрижки относительно велик. Ньютон Гайнс¹⁶, возбуждая никелевый стержень мощным гене-

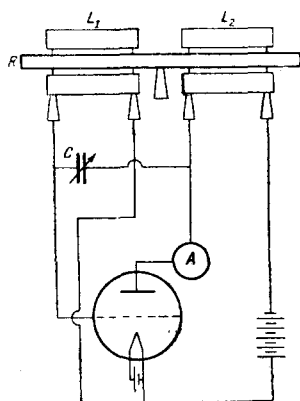


Рис. 2. Схема магнестрикционного генератора со стабилизированной частотой.

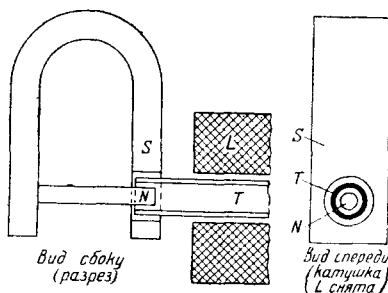


Рис. 3. Получение механических колебаний высокой частоты при помощи взаимодействия токов Фуко с постоянным магнитным полем.

ратором (500 W), получал настолько интенсивные колебания, что стержень разламывался. Стержень был помещен в жидкость, в которой создавались мощные ультразвуковые волны, причем наблюдались эффекты, аналогичные эффектам, вызываемым мощными ультразвуковыми колебаниями кварца (см. ниже).*

в) Осцилляторы, использующие токи Фуко. Получение электромеханических колебаний возможно, наконец, следующим способом. Если поместить в катушку колебательного контура медную трубку T , конец которой находится в постоянном магнитном поле, направленном по радиусам сечения трубки (рис. 3), то благодаря взаимодействию развивающихся в трубке токов Фуко с магнитным полем трубка приходит в колебания, амплитуда которых при резонансе резко возрастает, что легко наблюдать по звуку, издаваемому стержнем в момент резонанса (конечно, если

* С никелевыми трубками работал также Даниленко²⁹.

собственная частота стержня лежит в области звуковых частот). Попытка применить эти колебания для стабилизации лампового генератора не дала положительных результатов (возможно, что имевшееся в распоряжении магнитное поле было недостаточно сильно). Подобные колебания были применены Томилиной¹⁷ для изучения упругих свойств материала трубки, причем получились вполне удовлетворительные результаты.

Применяя достаточно короткие трубки, можно получить этим путем ультразвуковые колебания. Возможность создания мощных ультразвуковых колебаний представляется, правда, несколько сомнительной.

2. ИЗУЧЕНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ УЛЬТРААКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН

а) Газы. Для исследования распространения ультразвуковых волн в газообразных средах обычно пользуются интерферометром Пирса (рис. 4), состоящим из полированной пластинки, расположенной параллельно колеблющемуся кварцу и передвигаемой при помощи микрометрического винта по прямой, перпендикулярной ее плоскости¹⁸. Пластика отражает ультразвуковые волны обратно на поверхность кварца; когда между пластинкой и кварцем

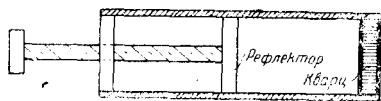


Рис. 4. Схема интерферометра Пирса.

укладывается целое число полуволи, создается максимальная реакция звукового поля на колеблющийся кварц, режим генерации нарушается и сеточный ток резко изменяется (можно следить также за изменениями анодного тока). При более точных измерениях при помощи интерферометра Пирса Пан-Ченг-Као¹⁹ установил, что измеряемая длина волны оказывается вблизи кварца больше, чем при измерениях на значительных расстояниях. Кроме того, удавалось наблюдать двойные максимумы анодного тока²⁰, причем определение скорости по тем или другим максимумам дает результаты, расходящиеся приблизительно на 0,5%. Причину этих искажений при измерениях Пильмейер видит во влиянии многократных отражений. Рейд²¹, также обнаруживший увеличение скорости вблизи кварца, производил измерения на расстоянии до 1 м; он нашел, что увеличение скорости вблизи кварца растет с частотой; на больших расстояниях скорость оказалась независимой от частоты. Хуббард²², считающий, что точность интерференционного метода весьма велика (до 0,05%) и ограничивается лишь точностью изготовления микрометрического винта, отрицал уменьшение скорости распространения при удалении от кварца.

Более грубым методом является использование охлаждающего эффекта ультразвуковых волн. В области звуковых частот Кренке²³ пользовался накаливаемой проволокой, протянутой вдоль трубки

Кундта. При образовании стоячих воздушных волн проволока охлаждалась в пучностях и оставалась накаленной в узлах, благодаря чему распределение стоячих волн могло быть продемонстрировано целой аудитории. Этот метод оказался неприменимым при частотах, больших 25 килогерц, так как охлаждаемые и нагретые участки слишком приближались друг к другу.

Бюкс и Мюллер²⁴ пользовались для исследования ультразвукового поля в воздухе накаленной волластоновой нитью, температура которой в пучностях ультразвуковых волн изменялась; нить была включена в одно из плеч мостика Уитстона, нарушение равновесия которого позволяло контролировать изменения температуры. Им удалось исследовать распределение энергии поля у поверхности кварца, имеющее довольно сложный характер (возможно, что искажения в скорости звука вблизи кварца обусловлены именно сложностью поля вблизи него), и измерить длину стоячих волн в воздухе.

Джонсон⁹² теоретически разработал вопрос об абсолютном измерении энергии в ультразвуковом поле (в воздухе) при помощи термоэлемента. На основании своей теории он сконструировал своеобразный термоэлемент из висмута и сурьмы, осаждаемых на целлулоидную пленку при помощи катодного распыления.

Испытание этого термоэлемента при низких частотах (до 5 килогерц) дало благоприятные результаты. По мнению Джонсона, его термоэлемент окажется применимым до 300 килогерц.

Тавий²⁵ пользовался для обнаружения ультразвуковых волн следующим остроумным методом Теплера. Оптическая система дает изображение щели, которое закрывается от наблюдателя проволокой подходящей толщины. При создании по пути светового луча стоячих ультразвуковых волн изображение щели делается видимым, так как возникающие изменения плотности воздуха изменяют его показатель преломления и ход лучей.

Петрцилка и Цаховал²⁶ пользовались аналогичным методом для изучения оптических свойств колеблющегося кварца. Для этой цели они пропускали через линзу и кварц пучок света, а затем при помощи другой линзы проектировали изображение на экран. В точку, где сходились лучи, собранные первой линзой, они помещали тонкую проволоку, скрывавшую изображение кварца при отсутствии колебаний. При возбуждении кварца, создававшимся ламповым генератором, на экране получалась картина, позволяющая судить о распределении амплитуд в колеблющемся кварце. Полученные авторами картины позволяют заключить, что изменения оптических свойств колеблющегося кварца пропорциональны четным степеням компонент электрических или механических напряжений, создаваемых в кристалле.

Кренке²³ исследовал поле ультраакустических колебаний довольно низкой частоты (20,5 килогерц) при помощи узкой тонкостенной стеклянной трубочки, содержащей песок. Концы трубки оттянуты и один из них закреплен. Под действием ультразвуковых колеба-

ний трубка приходит в колебания, напоминающие колебания колокола (образуются четыре узловых линии, параллельных оси трубки). Возбуждение иногда оказывается настолько сильным, что трубка ломается. Этим методом Кренке наблюдал стоячие волны, интерференцию и дифракцию ультразвуковых волн. Конечно, для очень быстрых колебаний этот метод неприменим, так как размеры трубки придется делать слишком малыми.

Яги и Матмо²⁷ получали ультразвуковые колебания с частотой порядка 10^4 герц при помощи двух слегка расстроенных магнито-стрикционных генераторов. Получающийся разностный тон звуковой частоты возбуждал стеклянную трубку с оттянутым концом. Ее широкий конец помещался у микрофона, соединенного через подходящий усилитель с громкоговорителем. Оказалось, что при дополнительном обдувании оттянутого конца трубки струей воздуха трубка действует как детектор звуковых колебаний. Этот остроумный метод позволил обнаружить ультразвуковое поле на расстоянии двухсот метров (!) от источников колебаний.

Абелло²⁸ помещал в ультразвуковое поле своеобразные крутильные весы с легким крылышком. Угол закручивания нити под действием ультразвуковых волн служил относительной мерой интенсивности ультразвука. Этот метод оказался очень ценным для исследования поглощения ультразвуковой энергии.

В ряде исследований он²⁹, а также Гроссман³⁰ использовали в качестве приемника ультразвуковой энергии второй кварц, настроенный в резонанс с первым. Подобный приемник не реагирует на побочные частоты и постоянное давление, что представляет известные преимущества. Очень точным оказался также метод, предложенный Хуббардом и Лумисом³¹. Вблизи кварцевого генератора, служащего для исследований, работает другой стабилизированный генератор, настроенный на близкую частоту (например, 500 и 501 килогерц). Получающийся тон биений сравнивается с тоном камертона, возбуждаемого электрически. При перемещениях рефлектора интерферометра, благодаря влиянию звукового поля на один из кварцев, происходят незначительные изменения частоты, компенсируемые вспомогательным конденсатором и контролируемые совпадением высоты тона биений и камертона.

Заслуживает упоминания также наблюдение эффекта Допплера, описанное Мюллером и Крэфтом³¹. Они помещали друг против друга два кварца, частоты которых слегка различались; при частотах, близких к 100 килогерц, получался разностный тон звуковой частоты (в 800 герц). Один из кварцев был неподвижен, а другой прикреплялся к секундному маятнику. При приведении маятника в колебание второй кварц то приближался к первому, то удалялся от него. В результате возникали два разностных тона с частотами 800 ± 24 герц, легко отличимые от разностного тона при неподвижных кварцах.

Сацердотэ³⁶ удалось сконструировать конденсаторный микрофон с мембраной из тонкого (от 2 до 5 микрон) алюминия, оказав-

шийся пригодным для регистрации ультразвуческих колебаний с частотой до 90 килгерц. Падение чувствительности микрофона начиналось с 20 000 герц. При помощи этого микрофона удалось наблюдать стоячие ультразвуковые волны в воздухе и произвести ряд других интересных наблюдений.

б) Жидкости и твердые тела. При исследовании распространения ультразвуковых волн в жидкости, кроме указанных выше методов, применялись и некоторые другие. При изучении распределения ультразвукового поля в жидкости удобно пользоваться термометром сопротивления, по которому пропускается

возможно малый ток, так что термометр остается холодным и не создает нагревания жидкости³⁵. За счет поглощаемой им ультразвуковой энергии он нагревается; для увеличения чувствительности полезно окружать его вспомогательным полуцилиндром, отражающим ультразвуковые волны на проволочку термометра. Таким образом удается исследовать отражение, преломление, дифракцию ультразвуческих колебаний и определить длину стоячих волн в жидкости. На рис. 5 изображено расположение кварца Q , зеркала S и термометра сопротивления

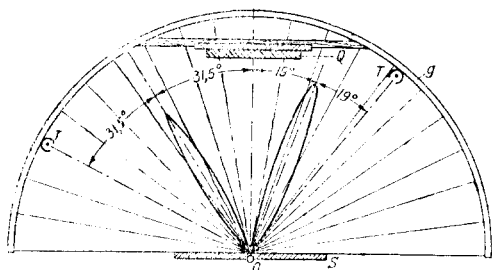


Рис. 5. Отражение ультразвуковых волн в жидкости.

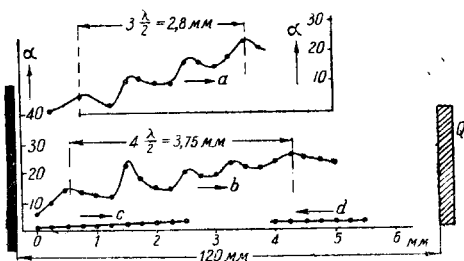


Рис. 6. Измерения стоячих ультразвуковых волн в жидкости при помощи термометра сопротивлений.

возможно малый ток. Вместо термометра сопротивления можно пользоваться также и термоэлементом.

Подобно пыльным фигурам Кундта в стоячих волнах в газе, можно получить такие же фигуры в жидкости; так, в воде прекрасные фигуры получаются при помощи мелкого коксового порошка³⁶. Бойль и Леман³⁷ первые заметили, что пузырьки газа, выделяющегося из жидкости, пронизываемой пучком ультразвуческих волн, в стоячих волнах собираются в узловых поверхностях,

так что термометр остается холодным и не создает нагревания жидкости³⁵. За счет поглощаемой им ультразвуковой энергии он нагревается; для увеличения чувствительности полезно окружать его вспомогательным полуцилиндром, отражающим ультразвуковые волны на проволочку термометра. Таким образом удается исследовать отражение, преломление, дифракцию ультразвуческих колебаний и определить длину стоячих волн в жидкости. На рис. 5 изображено расположение кварца Q , зеркала S и термометра сопротивления T и полярные диаграммы нагревания термометра при постепенном вращении зеркала; эти кривые доказывают, что ультразвуческие волны отражаются по обычным законам.

На рис. 6 изображены промеры в стоячих волнах (кривые a и b). При убирании рефлектора S получают кривые (c, d), не имеющие максимумов нагрева.

благодаря чему делается возможным непосредственное измерение длины волны. Впрочем, этот способ довольно груб.

При измерениях, не претендующих на исключительную точность, измерение энергии (в относительных единицах) удобно производить при помощи крылышка, отклоняющегося под действием звукового давления и изображенного на рис. 7³⁸. Ричардс³⁹ исследовал распределение интенсивности ультразвуковых волн в жидкости, наблюдая колебания мениска в капилляре, припаянном к небольшой воронке, помещенной в жидкость. Он нашел, что этот метод весьма удобен при самых различных интенсивностях. При изучении распространения ультразвуковых волн в твердых телах также удается наблюдать стоячие волны по движению легких частиц, помещенных на поверхность тела. Так, Соколов⁴⁰, передававший ультразвуковые колебания по металлической шине,

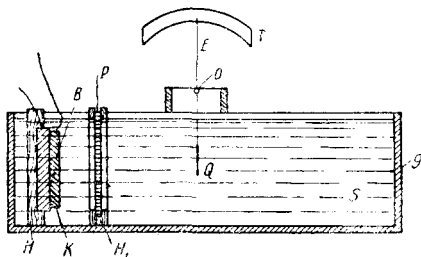


Рис. 7. Крылышко для измерения энергии ультразвуковых колебаний в жидкости.

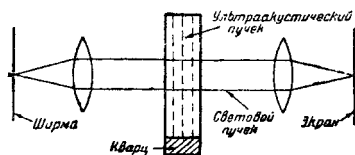


Рис. 8. Наблюдение дифракции света в ультразвуковой решетке.

наблюдал колебания капелек воды, помещенных на поверхность шины.

Для определения поглощения ультразвуковой энергии твердыми телами также можно пользоваться крылышком, изображенным на рис. 7, измеряя его отклонения при наличии на пути ультразвукового пучка пластинок из исследуемого материала P и при ее отсутствии. Можно также вместо крылышка пользоваться термозлементом⁴¹.

Клейн и Герцбергер⁴² определяли скорость ультразвуковых волн в твердых телах, помещая их в жидкость интерферометра и наблюдая смещение, необходимое для восстановления стоячей волны.

в) Оптические методы измерения. Люка и Бикард⁴³ и независимо от них Дебай и Сирс⁴⁴ установили, что при пропускании через жидкость или твердое тело, пронизываемые ультразвуковыми волнами, пучка света, распространяющегося перпендикулярно ультразвуковым волнам (рис. 8), наблюдаются дифракционные явления и вместо одного изображения щели получается несколько, причем число их возрастает с интенсивностью ультразвуковых колебаний. С теоретической точки зрения это явление, тесно связанное с представлением о „тепловых волнах“,

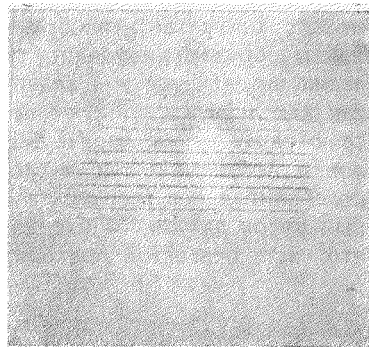
пронизывающих тело во всех направлениях, представляет значительный интерес. Подробная теория его была развита Бриллюэном⁴⁵ Диебаем⁴⁶.

На рис. 9 изображены диффракционные картины, наблюдающиеся при пропускании света через ультразвуковую решетку в воде (А), эфире (В), кварце (С).

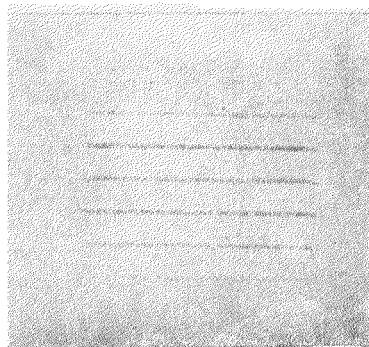
Так как постоянная ультразвуковой диффракционной решетки определяется скоростью распространения ультразвуковых колебаний, а число получаемых спектров характеризует интенсивность ультразвуковых волн, то этот метод является очень ценным при исследовании распространения ультразвуковых волн в различных (прозрачных для света) средах.

Бикард⁴⁷ предложил весьма оригинальный способ определения коэффициента поглощения. Передвигая сосуд, изображенный на рис. 8, он заставляет световой луч пронизывать ультразвуковое поле на большем или меньшем расстоянии от кварца. Изображение центральной щели проектируется на фотоэлемент, ток которого служит мерой интенсивности рассеяния света в ультразвуковой решетке, в свою очередь зависящего от интенсивности ультразвуковых колебаний.

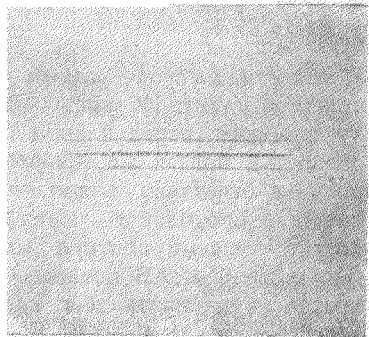
Бергманн⁴⁸ использовал это явление для градуировки волномера. Если основная частота кварца известна, то частота обертонов, легко возбудимых до очень высоких порядков, просто определится по относительному положению диффракционных изображений щели, благодаря чему для градуировки получается большое число опорных точек, определяемых без всяких затруднений.



А



В



С

Рис. 9. Диффракционные явления при прохождении света через ультразвуковую решетку в различных веществах.

Бэр и Мейер ⁴⁹ заменили одну щель бледной с большим числом мелких отверстий, изображение коих проектировали на экран. Таким образом им удалось получить наглядную картину распределения интенсивности в значительном участке ультразвукового поля, так как лучи, идущие от каждого отверстия, давали на экране свою характерную картину. Этот метод был использован Хидеманом и Асбахом ⁵⁰ для исследования прохождения ультразвуковых колебаний через твердое тело. В жидкость помещался клинообразный кусок латуни, и бленда с отверстиями устанавливалась так, что часть отверстий приходилась перед клином, часть после него.

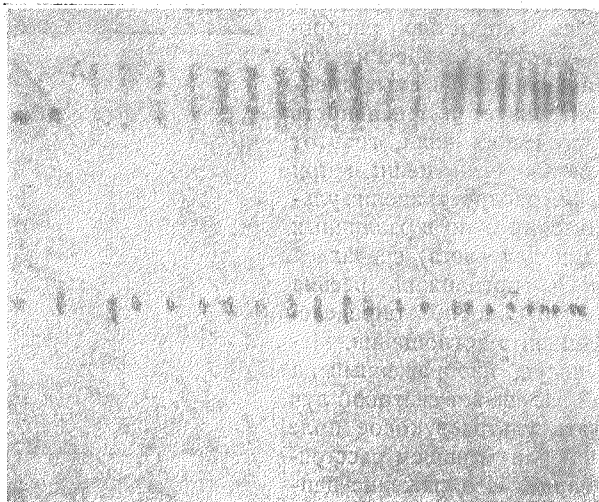


Рис. 10. Наблюдение дифракции по Бэру — Мейру.

В последнем случае разным отверстиям соответствовала различная толщина клина. На рис. 10 левая часть представляет картину, получающуюся перед клином (наибольшая, везде одинаковая интенсивность), правая же — картину, получающуюся после клина. На рисунке отчетливо видно, что с увеличением толщины клина количество проходящей через него энергии меняется периодически, достигая максимумов при толщине, равной целому числу полуволен (см. ниже § 4). В последнее время метод Бэра и Мейера неоднократно применялся для исследовательских и демонстрационных целей.

Если пропускать через жидкость не один, а несколько ультразвуковых пучков, то можно получить дифракционную картину, соответствующую случаю перекрещенных решеток.

Благодаря рассеянию света ультраакустической решеткой интенсивность света в плоскости, параллельной плоскости световой волны,

входящей в жидкость, делается неравномерной. Пуская в жидкость световую волну и рассматривая в микроскоп одну из таких плоскостей, можно наблюдать непосредственное строение ультразвуковой решетки, если в жидкости созданы стоячие ультразвуковые волны ⁵¹ (в случае проходящих ультразвуковых волн приходится пользоваться стробоскопом). Яркость получаемой картины весьма велика, разделение поля зрения на светлые и темные полосы вполне отчетливо. На рис. 11, заимствованном из статьи Хидеманна, Асбаха и Бахема ⁵², изображены микрофотографии стоячей волны и интерферирующих падающей и отраженной волн, образованных в сосуде, наполненном ксилолом.

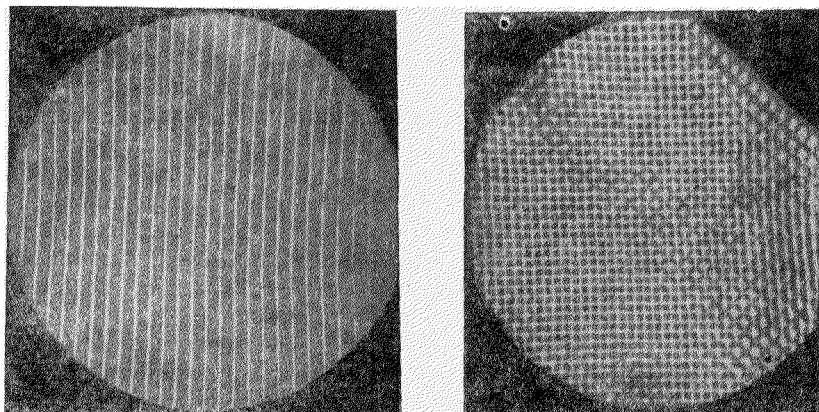


Рис. 11. Наблюдение стоячих ультразвуковых волн по методу Хидеманна—Асбаха.

Шефер и Бергман ⁸⁹ создавали в жидкости три взаимноперпендикулярных пучка ультразвуковых колебаний и наблюдали дифракцию света в подобной пространственной решетке. Они же возбуждали кварцевую пластинку кубической формы и наблюдали интерференционные картины, получающиеся при пропускании через нее различно ориентированных пучков света.

При этом получались интерференционные картины, обладавшие той же симметрией, что и соответственные диаграммы Лауэ.

Хидеманн изучал ультразвуковую решетку в кварце, колеблющемся на обертонах высоких порядков (до 61-го), и нашел что число полос, получающихся в кварце, равно номеру возбужденного обертона ⁵³. Оптическим методом изучения распределения интенсивности колебаний в кварце пользовались также Шефер и Бергманн ⁸⁹. Висс ⁹⁰ объединил метод дифракционных спектров с методом акустического интерферометра. Он помещал против кварца рефлектор интерферометра и наблюдал дифракцию светового пучка, перпендикулярного ультразвуковому, при переме-

щении рефлектора. Интенсивность диффракционной картины служила индикатором образования стоячих ультразвуковых волн. Точность установки рефлектора достигала $0,20/_{00}$. Результаты работы Висса оказались неожиданными: сравнивая значения длины ультразвуковой волны, вычисленные по смещению рефлектора интерферометра, со значениями, вычисленными из диффракционной картины (очевидно, метод Висса позволяет одновременно произвести оба наблюдения), Висс нашел значительное расхождение полученных результатов, значительно выходящее за пределы ошибок наблюдения. Работа Висса, опубликованная недавно и в малораспространенном журнале, еще не вызвала откликов, так что вопрос о реальности и причинах этого расхождения до настоящего времени остается открытым.

Большой интерес представляет также изучение распределения амплитуд колебаний на поверхности колеблющегося кварца. Простейшим способом является наблюдение узловых линий при помощи какого-либо порошка (например ликоподия), насыпанного на поверхность кварца. Однако этот метод довольно груб, а при сильных колебаниях делается совсем неприменимым, благодаря образованию „звукового ветра“, замеченного Мейсснером ³² еще в 1926 г. Этот „ветер“, настолько сильный, что им удается отклонить пламя свечи, создается при периодических изменениях размеров пластинки. Возникающие токи воздуха, конечно, искажают распределение ликоподия на поверхности кварца.

Более надежным представляется метод, предложенный Остербергом ³³ и Штраубелем ³⁴. Они используют кварц в качестве одного из зеркал майкельсоновского интерферометра и наблюдают изменения освещенности его при колебаниях. Штраубель обнаружил, что узловые линии, получающиеся на прямоугольной пластинке кварца, оказываются прямыми в середине пластины и искривляются к ее краям. В круглых пластинах получается сложная картина линий.

При увеличении амплитуды колебаний распределение линий несколько изменяется. Штраубель указывает далее, что амплитуда колебаний кварца растет не пропорционально напряжению, но несколько медленнее.

Хидеманн и Зейфен ³⁵ разработали изящный метод наглядного оптического доказательства возбуждения кварца на обертонах, а также демонстрации расширения резонансной кривой кварца благодаря значительному затуханию, обусловленному окружающей кварц жидкостью. Кварц помещался на дно сосуда с параллельными стенками, наполненного ксилолом; перпендикулярно направлению распространения ультразвуковых волн пускался параллельный пучок световых лучей, и получающаяся картина ультразвуковой диффракционной решетки проектировалась на экран при помощи оптической системы, дававшей лишь изображение небольшого участка, на котором легко было можно подсчитать число светлых и темных полос. При основной частоте кварца (697,6 килогерц) получалось 8 полос. Уменьшая частоту возбуждения, удавалось довести число

полос до 7, при повышении же частоты оно возрастало до 9. Эти изменения числа полос ясно доказывают, что резонансная кривая кварца расширяется благодаря затуханию, создаваемому жидкостью. Опыт показал, что возбуждение основного тона кварца происходило в интервале частот от 560 до 935 килогерц. Аналогичным способом можно наблюдать и возбуждение кварца на обертонах, причем число видимых полос соответственно возрастает. Благодаря затуханию область частот, при которых возбуждаются обертоны, также оказывается довольно широкой; так, третья гармоника возбуждалась в интервале от 1421 до 2143 килогерц, пятая — от 3140 до 3700 килогерц и т. д.

Возможность получения подобной картины на экране большой аудитории, где расстояние между полосами можно довести до 10 см, благодаря чему изменение картины при вариации частоты возбуждения кварца делается легко наблюдаемым, делает этот метод очень ценным с педагогической точки зрения.

3. СКОРОСТЬ РАСПРОСТРАНЕНИЯ И ПОГЛОЩЕНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ В РАЗЛИЧНЫХ СРЕДАХ

а) Твердые тела. Скорость распространения ультразвука в твердых телах ограниченных размеров (стержни, пластинки), очевидно, зависит от того рода колебаний, которые возбуждаются в теле. Возможно возникновение следующих типов колебаний: 1) растягивающие (обычные продольные), скорость распространения которых определяется при звуковых частотах модулем упругости и плотностью, а при очень высоких частотах несколько уменьшается; 2) изгибающие колебания (поперечные), скорость распространения которых невелика и изменяется пропорционально корню из частоты; 3) радиальные и 4) крутильные. Последние два рода колебаний возбуждаются относительно редко.

Измерения скорости ультразвука в твердых телах довольно немногочисленны. Бойль ⁵⁴, определяя по методу стоячих волн скорость продольных ультразвука колебаний в дуралюминиевых стержнях с длиной l от 4 до 60 см и радиусом $R = 0,6—2,5$ см, нашел, что при малых значениях R/l скорость распространения $v = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$, где E — модуль упругости, ρ — плотность; при больших значениях отношения R/l это соотношение теряет силу, причем ни один из известных поправочных членов не дает результатов, совпадающих с опытом. Дерфлер ⁵⁵, работавший с кварцевыми пластинками, нашел, что при низких частотах скорость распространения изгибающих колебаний соответствует теоретической, при высоких же частотах она стремится к скорости распространения поперечных колебаний в безграничной среде.

Рерих ⁵⁶, приводивший в продольные колебания металлические стержни, помещая между ними и колеблющимся кварцем слой масла, нашел, что при некоторых значениях возбуждающей частоты обра-

зование стоячих волн затрудняется благодаря возникновению крутильных колебаний. Скорость распространения продольных колебаний при частотах, превышающих 100—150 килогерц, уменьшалась и при 500—600 килогерцах совпадала со скоростью, полученной Дерфлером.

Ряд работ канадских исследователей был посвящен изучению распространения ультразвуковых колебаний в трубках, наполненных различными жидкостями. Подведя им итоги, Филд⁵⁷ находит, что при некоторой частоте, совпадающей с собственной частотой радиальных колебаний трубки, имеет место дисперсия скорости продольных колебаний, сопровождающаяся интенсивным поглощением их, так как радиальные колебания поддерживаются за счет энергии продольных.

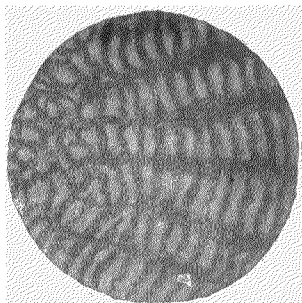


Рис. 12. Картина интерференции ультразвуковых волн на поверхности металлической болванки (по Соколову).

Измерения поглощения ультразвуковой энергии в твердых телах затрудняются тем, что при изучении прохождения колебаний через перегородку, помещенную в жидкость, содержащую колеблющийся кварц, приходится считаться не только с поглощением, но и с отражением ультразвуковой энергии (см. ниже). В металлах поглощение ультразвуковой энергии очень невелико, так что Соколову⁴⁰ удалось исследовать прохождение ультразвуковых колебаний через металлическую болванку в несколько десятков сантиметров длиной. Он ставил болванку на ртутный электрод, через который к кварцу подводилось высокое напряжение (передача энергии из ртути в металл происходит с относительно небольшим отражением), а на верхнее основание болванки наливал слой расплавленного парафина. Проходившие ультразвуковые колебания имели настолько значительную амплитуду, что в застывающем парафине получалась отчетливая интерференционная картина, обычно обладавшая некоторой симметрией (рис. 12). При наличии внутри болванки раковин или других дефектов симметрия резко нарушалась. По мнению Соколова, подобная „ультразвуковая дефектоскопия“ может сыграть важную роль в металлической промышленности. В вязких средах (смолы, вар), а также в эбоните и бакелите поглощение ультразвуковой энергии очень велико.

При переходе ультразвуковой энергии из одной среды в другую на первый план выступает явление отражения. Доля отраженной энергии (если падающую принять за единицу) определяется коэффициентом отражения:

$$R = \left(\frac{\rho_1 v_1 - \rho_2 v_2}{\rho_1 v_1 + \rho_2 v_2} \right)^2, \quad (1)$$

где $\rho_i v_i$ — произведение плотности среды на скорость распростра-

нения колебаний. Эта формула, теоретически полученная для безгранично протяженных сред, хорошо оправдывается в тех случаях, когда протяжение среды значительно превышает длину волны. На границе между твердым телом и воздухом отражение весьма велико, вследствие чего все ультразвуковые исследования, требующие заметной мощности, должны производиться в жидкости. Приведем несколько значений коэффициента отражения:

Вода — сталь $R = 0,85$
 Вода — гранит $R = 0,6$
 Вода — лед $R < 0,13$ (в зависимости от давления)
 Ртуть — сталь $R = 0,10$

Интересное подтверждение правильности этих величин было получено при исследованиях эхолота у берегов Канады. При помощи одного и того же прибора присутствие береговой скалы обнаруживалось на расстоянии, вчетверо превышавшем расстояние, на котором замечались пловучие льды.

Если же исследуется звукопроницаемость тонкой (по сравнению с длиной волны) перегородки, то коэффициент отражения, как показал Рэлей, определяется выражением:

$$R = \frac{(r_{21} - r_{12})^2}{(r_{21} + r_{12})^2 + 4 \operatorname{ctg}^2 \frac{2\pi d}{\lambda_2}}; \quad r_{ik} = \frac{\rho_k v_k}{\rho_i v_i}, \quad (2)$$

где $\rho_1 v_1$ — акустическое сопротивление окружающей перегородку среды, $\rho_2 v_2$ — акустическое сопротивление материала перегородки, d — ее толщина, λ_2 — длина волны в материале, из которого сделана перегородка.

Легко видеть, что в этом случае при возрастании толщины перегородки отражение должно периодически изменяться, исчезая при толщинах, удовлетворяющих условию

$$d = n \frac{\lambda_2}{2} \quad (n = 1, 2, 3, \dots). \quad (3)$$

Экспериментальной проверкой этой формулы много занимался Бойль со своими сотрудниками⁵⁸. Результаты их исследований со свинцовыми перегородками, помещаемыми в воде, изображены на рис. 13, где пунктирная кривая представляет теоретические, а сплошная — измеренные значения коэффициента отражения. Качественное совпадение весьма удовлетворительно, количественные же расхождения могут быть объяснены отчасти поглощением в стенке и, главным образом, несовершенством измерителя энергии (крутильный маятник). Ричардс⁴¹, измерявший энергию ультразвука, прошедшего через перегородку, при помощи термоэлемента, также обнаружил периодические изменения количества прошедшей энергии при увеличении толщины перегородки.

В архитектурной акустике пытаются связать звукоизоляцию стен т. е. логарифм отношения падающей энергии к проходящей, с весом 1 см^2 поверхности стены. Эта зависимость может быть полу-

чена при определенных условиях из формулы Рэлея, причем следует ожидать, что звукоизоляция будет пропорциональна квадрату веса и будет возрастать при увеличении частоты падающих на стену колебаний. Однако экспериментальные данные о звукоизоляции строительных материалов при звуковых частотах дают другие значения показателя веса стенки (от 1,4 до 2,5).

Аналогичные исследования при ультразвуковой частоте³⁸ обнаружили, что в известных пределах звукоизоляция пропорциональна весу в степени 1,4. Абсолютные ее значения, как и следо-

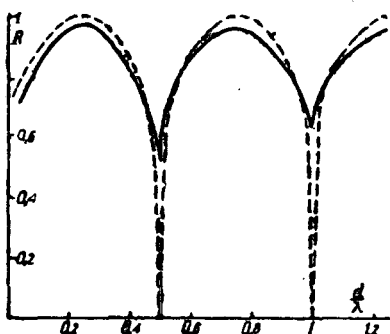


Рис. 13. Зависимость коэффициента отражения ультразвуковых волн от толщины перегородки (по Бойлю). Сплошная кривая — данные эксперимента. Пунктирная — теоретическая.

жидкости принадлежат Бойлю и его сотрудникам³⁹. Скорость определялась по стоячим волнам, наблюдавшимся по скоплению пузырьков газа в узловых поверхностях. Для воды, различных спиртов и водных растворов NaCl и KCl, а также для трансформаторного масла и масла с большой вязкостью (в 50 раз превышавшей вязкость воды) скорость оказалась независимой от частоты в интервале частот от 45 до 570 килогерц. Кроме того, этими авторами была изучена температурная зависимость скорости, причем при возрастании температуры скорость возрастала. Численные значения скорости не отличались от скорости распространения слышимых частот, или значений, вычисленных по обычной формуле:

$$v = \sqrt{\frac{\gamma}{\rho \kappa}} \quad (4)$$

где ρ — плотность, $\gamma = c_p/c_v$ — отношение удельных теплоемкостей, κ — коэффициент сжимаемости жидкости.

Ряд определений скорости, давших аналогичные результаты, был выполнен Хуббардом и Лумисом³¹ и Маловым³⁵, определявшим

ваго ожидать, оказались значительно выше, чем при звуковых частотах. Исследования велись при помещении исследуемых перегородок в трансформаторное масло. Интересно отметить также, что звукоизоляция перегородок из картона или дерева, впервые опущенных в масло, оказалась весьма большой; однако после пропитывания перегородок маслом она резко падала. Очевидно, высокое начальное значение объясняется наличием пузырьков воздуха в порах этих перегородок.

б) Жидкости. Первые измерения скорости распространения ультразвуковых волн в

скорость по измерению длины стоячих волн и показателя преломления при помощи термометра сопротивления. Тэйлор и Спрул⁶⁰ нашли, что после двухдневного непрерывного прохождения интенсивных ультразвуковых колебаний через водопроводную воду скорость ультразвуковых волн изменилась от 1480 до 1520 м/сек (при постоянной температуре). Это изменение скорости они приписывают удалению абсорбированного газа, выделяющегося, как указывалось выше, под действием ультразвуковых колебаний. Рэндалл⁶¹ определял коэффициенты сжатия жидкостей по длине стоячих ультразвуковых волн.

В табл. 1 приводятся скорости распространения ультразвуковых колебаний в различных жидкостях.

ТАБЛИЦА 1
Скорость распространения ультразвуковых колебаний
(в м/сек)

Название среды	0°C	20°C	50°C
Бензол	—	1324	1184
Этиловый спирт	1242	1168	1067
Ацетон	1273	1190	1057
Хлорбензол	1362,5	1284,5	1178
Толуол	1414	1327,5	1199
Хлороформ	1069,0	1002,5	897,0
Этиловый эфир	1095	1006	—
Метиловый спирт	1187	1121	1023,5
Гектан	1235	1154	1028
Оптан	1277	1192	1066
Анилин	1742	1659	1540
Глицерин	—	1923	1868,5
Бромформ	—	928	865
Ртуть	1460,2	1451,0	1437,1
Вода 0°	1407,0		
5°	1427,7		
10°	1448,8		
20°	1484,2		
30°	1509,9		
40°	1530,5		
	15°C	25°C	35°C
NaCl 1%	1487	1520	1542
2,5%	1510	1539	1561
5%	1540	1569	1589

После открытия дифракционного воздействия ультразвуковых колебаний на световые лучи, Бикард^{47,62} произвел ряд измерений

скорости распространения и коэффициентов поглощения ультразвуковых колебаний в жидкостях. Измерения Бикарда производились при частоте около 8 мегагерц и дали (в отношении коэффициента поглощения) значительное расхождение с вычисленными из обычных представлений значениями (табл. 2); объяснения этому расхождению еще не дано.

ТАБЛИЦА 2
Коэффициенты поглощения ультразвуковых колебаний

Жидкость	Вычислено	Измерено
Толуол	$0,497 \cdot 10^{-2}$	$5,4 \cdot 10^{-2}$
Метаксилол	0,78	4,7
Этилацетат	0,67	4,9
Эфир	0,57	3,5
Метилацетат	0,53	6,9
Бензол	0,54	58
Хлороформ	0,66	30
Ацетон	0,44	2
Вода	0,64	2

Измерения скорости распространения ультразвуковых колебаний производились и другими авторами ^{44, 48, 49}, причем полученные ими величины скорости оказались в хорошем совпадении с результатами, полученными другими методами. Кроме приведенных в табл. 2 результатов Бикарда, данные остальных работ позволяют думать, что распространение ультразвуковых частот в жидкости подчиняется обычным законам, выведенным для слышимых частот. Исходя из экспоненциального закона убывания амплитуды при распространении колебаний в поглощающей среде

$$A = A_0 e^{-\alpha_1 x} = A_0 e^{-\alpha_1 n \lambda}$$

(расстояние x выражено здесь в длинах волн) и принимая, что поглощение обусловлено, главным образом, внутренним трением среды, проводящей колебания, для множителя затухания α_1 получаем следующее выражение, данное Стоксом:

$$\alpha_1 = \frac{16\pi^2 f \eta}{3\rho v^2}, \quad (5)$$

где ρ и v — плотность и скорость распространения, η — коэффициент внутреннего трения, f — частота. Пользуясь (5), легко вычислить, что уменьшение амплитуды до $\frac{1}{e}$ -ой части первоначального значения произойдет (при $f = 100$ килогерц) в воде при $x = 3,6$ км. Отсюда становится ясным удобство использования ультразвуковых колебаний для подводной телеграфии. Невозможность при-

менить для этой цели колебания слышимой частоты объясняется необходимостью пользования направленным (малорасходящимся) пучком, получение которого при низких частотах требует очень большой поверхности излучателя или применения непортативных больших зеркал. При ультразвуковых же частотах площадь излучателя, дающего достаточно мощный слабо расходящийся пучок лучей, оказывается не слишком большой. Действительно, из теории колебания круглых поршневых мембран известно, что направленность пучка растет с возрастанием отношения радиуса R мембраны к длине волны λ излучаемого пучка колебаний. На рис. 14 приводится характеристика излучения мембран при $R/\lambda = 0,48$; $0,80$ и $1,75$. Уже в последнем случае направленность пучка выражена весьма резко.

В практически применявшемся кварцевом эхолоте радиус излучателя равнялся 10 см, частота — $37,5$ килогерц (длина волны в воде около 4 см); здесь $R/\lambda = 2,5$ и направленность пучка еще больше, чем в последнем случае рис. 14. Угол раствора составлял всего 14° .

Измерения скорости ультразвуковых колебаний в ряде жидкостей при частотах 243 и 940 килогерц произвел Шпаковский⁹⁷; при обеих частотах скорость оказалась постоянной.

Предполагая возможность дисперсии при высокой частоте ультразвука благодаря выпадению части теплоемкости (см. дисперсию в многоатомных газах, § 3,8), автор находит, что отношение скоростей v_1 и v_2 при частотах f_1 и f_2 должно определяться уравнением:

$$\frac{v_1}{v_2} = \sqrt{k - \frac{c_p'}{c_p''} (k - 1)},$$

где $k = \frac{c_p'}{c_v}$, c_p' — теплоемкость при постоянном давлении, определяющая скорость распространения колебаний низкой частоты, c_p'' — теплоемкость, существующая при высоких частотах, причем $c_p' > c_p''$. Величину возможной дисперсии автор оценивает в 10% .

Кроме незначительного поглощения ультразвуковых колебаний в жидкости, весьма благоприятными являются и условия передачи энергии от излучателя в жидкость (см. выше); в случае распространения ультразвуковых волн в газах поглощение их возрастает, а условия их излучения благодаря сильному отражению резко ухудшаются; поэтому воздушная сигнализация ультразвуками не

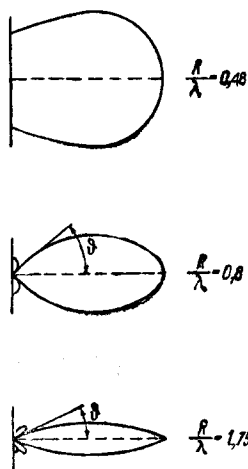


Рис. 14. Характеристика излучения поршневых мембран в зависимости от соотношения между длиной волны и радиусом мембраны.

имеет практического значения. Однако изучение распространения ультразвуковых волн в газах (особенно многоатомных), к которому мы теперь перейдем, представляет существенный интерес с теоретической стороны.

в) Газы. Изучение распространения ультразвуковых колебаний в газах привлекло внимание исследователей благодаря возникновению аномальной дисперсии ультразвуковых колебаний в многоатомных газах; эта дисперсия отсутствует в области слышимых частот и сказывается лишь при частотах порядка сотен тысяч герц. С теоретической точки зрения она представляет значительный интерес, и ее изучению было посвящено большое число работ.

Поскольку речь идет об одноатомных газах, скорость распространения ультразвуковых колебаний определяется обычным уравнением:

$$v = \sqrt{\frac{p}{\rho}} \gamma,$$

где p — давление газа, ρ — его плотность и γ — отношение удельных теплоемкостей c_p и c_v . При изучении поглощения ультразвуковых колебаний в газах, кроме поглощения, обусловленного внутренним трением α_1 (см. § 3, б), следует считаться и с другими факторами, увеличивающими поглощение. Благодаря мгновенному нагреванию сгущений существует некоторая теплоотдача из этих участков в охлажденные области, где господствует разрежение. Эта теплоотдача происходит за счет энергии распространяющихся колебаний и характеризуется коэффициентом α_2 , составляющим для воздуха около $0,3 \alpha_1$. Для воды и других жидкостей α_2 значительно меньше, чем α_1 .

Далее, при распространении колебаний в смеси нескольких газов, составные части которой не вступают друг с другом в химические реакции, следует считаться с дополнительным рассеянием энергии, обусловленным относительным увеличением концентрации более тяжелых составных частей в сгущениях и более легких в разрежениях⁶³; эти изменения концентрации требуют добавочного расходования энергии колебаний, характеризуемого коэффициентом α_3 , который для воздуха достигает приблизительно десятой части α_1 .

Все коэффициенты α_1 , α_2 , α_3 растут пропорционально частоте. Поглощение ультразвуковой энергии в одноатомных газах относительно невелико; возрастание скорости, обусловленное увеличением поглощения, лежит за пределами измерительных возможностей во всей области ультразвуковых частот. Значительно более сложные явления наблюдаются в многоатомных газах, где поглощение может делаться очень значительным и дисперсия ультразвуковых колебаний оказывается легко измеримой.

Причина этого явления заключается в том, что при достаточно высоких частотах часть теплоемкости газа перестает влиять на процесс распространения. Действительно, в многоатомном газе полная

энергия молекулы складывается из энергии поступательного движения (эту энергию мы имеем и у одноатомных газов) и энергии вращательных или колебательных движений, которые могут совершать составные части многоатомной молекулы (внутренняя энергия). Число молекул, обладающих вращательной или колебательной энергией, является функцией температуры. Установление равновесия между внутренней и внешней энергией при изменении температуры происходит в некоторых случаях в промежутки времени, сравнимые с периодом адиабатических изменений температуры в ультразвуческой волне, если частота ее достаточно велика.

При дальнейшем повышении частоты окажется, что то или иное колебательное и вращательное состояние вообще не сможет установиться, так как изменения температуры в волне происходят слишком быстро; благодаря этому теплоемкость газа соответственно уменьшится, а скорость распространения ультразвуческих волн должна будет возрасти.

Если допустить, что среди возможных состояний молекулы имеется только одно, требующее значительного времени для своего установления, т. е. что могут существовать лишь молекулы двух родов — с возбужденным состоянием и без него, то, как показывает расчет, данный Кнезером⁶⁴ и в несколько иной форме Герифельдом и Рейсом⁶⁵, зависимость скорости v от частоты колебаний f определится кривой, изображенной на рис. 15 вверху. Скорость V_1 соответствует бесконечно медленным изменениям температуры (а следовательно, и бесконечно длинным периодам ультразвуческих колебаний, при которых все молекулы приходят в возбужденное состояние), скорость V_2 соответствует очень малым периодам колебаний, при которых ни одна молекула не успевает следовать за изменениями температуры, так что соответствующая возбужденному состоянию молекулы доля теплоемкости выпадает из общей величины теплоемкости газа.

Очевидно, при возможности нескольких колебательных или вращательных состояний молекул, нуждающихся для своего установления в различных промежутках времени, спектр скорости распространения ультразвуческих колебаний будет иметь несколько подъемов, подобных изображенному на рис. 15.

В области дисперсионных частот должно наблюдаться добавочное

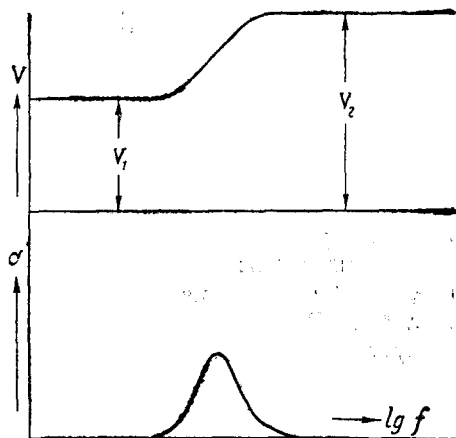


Рис. 15. Дисперсия и абсорбция ультразвуческих волн в многоатомном газе.

поглощение ультразвуковой энергии. Действительно, так как часть молекул, возбуждаясь, поглощает соответственное количество энергии, часть же, покидая состояние вращательного движения, выделяет соответственное количество энергии, то и равновесное состояние газа в отношении энергии поступательного движения в ультразвуковой волне наступает не сразу; следовательно, давление, пропорциональное энергии поступательного движения, также будет устанавливаться не мгновенно, а потому окажется сдвинутым по фазе относительно изменений плотности. Но это значит, что на диаграмме состояния газа за каждый период ультразвука акустической волны будет описываться некоторая площадь, т. е. энергия ультразвука акустических колебаний будет переходить в тепловую. При частотах же, лежащих вдали от дисперсионных, это поглощение будет отсутствовать, так как состояние равновесия будет устанавливаться достаточно быстро (при низких частотах) или же перехода энергии в энергию вращательного движения молекул вообще не будет происходить (при высоких частотах). Ход кривой поглощения, характеризуемого коэффициентом α , изображен на рис. 15 внизу. При нескольких возможных состояниях вращательного движения молекул, очевидно, на кривой поглощения должно будет образоваться несколько максимумов. Разумеется, кроме рассмотренного здесь поглощения, следует считаться с поглощением, обусловленным внутренним трением и теплообменом в газе (коэффициенты α_1 и α_2).

Аналитические выражения скорости и коэффициента поглощения имеют следующий вид:

$$v^2 = \frac{p}{\rho} \left\{ 1 + R \frac{c_0 + c_\infty \omega^2 \beta^2}{c_0^2 + c_\infty^2 \omega^2 \beta^2} \right\}$$

$$\alpha = 4\pi \sqrt{\frac{1}{2}(1 - \cos \varphi)}.$$

Здесь R — газовая постоянная, c_0 и c_∞ — теплоемкости при очень низких и очень высоких частотах, $\omega = 2\pi f$ — круговая частота ультразвука акустических колебаний, $\beta = \frac{1}{x_{01} + x_{01}}$, а x_{10} и x_{01} определяют частоты перехода молекул из возбужденного состояния в невозбужденное и обратно. Эти частоты являются функциями температуры, а потому дисперсионная область ультразвуковых частот должна смещаться при изменении температуры.

Сдвиг фаз между плотностью и давлением определяется выражением:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{(V_2^2 - V_1^2) \omega \omega_1}{V_1^2 \omega_1^2 + V_2^2 \omega^2},$$

где $\omega_1 = \frac{1}{\beta} \frac{c_0}{c_\infty} = 2\pi f_1$ определяет положение точки перегиба дисперсионной кривой (рис. 15).

Более строгую теорию аномальной дисперсии в многоатомных газах развили Ричардс⁶⁶ и Кнезер⁶⁴. Аналогичная дисперсия должна существовать и в частично диссоциированных газах. Расчет этого явления был дан Эйнштейном⁶⁷.

Палаиолагас⁶⁸ одним из первых исследовал скорость распространения ультразвука в воздухе. Он работал с частотами, не превышавшими 207 килогерц, и не обнаружил никакой дисперсии.

Измерения в одноатомных газах были произведены Абелло²⁹; он нашел, что чистый аргон поглощает так же, как воздух. Примесь 1% гелия к воздуху незначительно увеличила коэффициент поглощения. В двухатомных газах дисперсия была впервые обнаружена Пирсом¹⁸. Он нашел, что в CO_2 при изменении частоты от 42 до 206 килогерц скорость возросла с 258,8 м/сек до 260,2 м/сек. Для более высоких частот CO_2 оказалась совершенно непрозрачной (этот результат в дальнейшем не подтвердился). Так как незначительные примеси посторонних газов очень сильно влияют на коэффициент поглощения, то результаты исследований поглощения ультразвуковых колебаний в CO_2 , произведенных различными авторами^{29,64}, оказываются не вполне совпадающими. Однако дисперсия в области частот от 10^5 до 10^6 герц подтверждается. Пиельмейер⁶⁹ находит максимум поглощения при частоте $f = 2,17 \cdot 10^5$ герц.

Небольшое число измерений было проделано с CS_2 ⁷⁰, где дисперсия найдена при частотах, меньших 500 килогерц; с SO_2 ³⁰, где, повидимому, максимум абсорбции лежит при очень высоких частотах, и с NO_2 ²⁹, где ход кривой поглощения аналогичен CO_2 . Распространение ультразвука в H_2 исследовано Абелло²⁹ и Ричардсом и Рейдом⁷¹; они нашли, что скорость возрастает от 1319 м/сек при 94 килогерцах до 1409 м/сек при 450 килогерцах; анализ полученных ими результатов позволяет думать, что дисперсия вызвана выпадением части теплоемкости, соответствующей вращательному движению молекулы. Однако Вальмани и Беккер, еще не опубликовавшие деталей своих измерений, указывают¹, что ими не найдено никакой дисперсии в области от 358 до 1290 килогерц, причем полученное значение скорости совпадает с его величиной для слышимых частот (в последних опытах чистота H_2 достигала 99,6%).

Влияние посторонних газов и поглощение в смесях газов исследовали Барнесс⁷¹, Ричардс и Рейд⁷⁰, Кнезер⁷² и Кнудсен⁷³. Все они нашли весьма резкое влияние даже небольших примесей, объясняемое тем, что соударения различных молекул оказываются более действенными (в отношении возбуждения молекул), чем соударения молекул одного и того же газа. О значительности влияния даже незначительных примесей можно судить по рис. 16, заимствованному из работы Кнезера⁷² и содержащему кривые абсорбции слышимых частот во влажном воздухе; соответственные измерения с очень большой точностью были проделаны Кнудсеном⁷³.

Распространение ультразвука в частично диссо-

цированных газах и связанная с этой частичной диссоциацией дисперсия изучались Ричардсом и Тейгером⁷⁴ в N_2O_4 при различных давлениях в интервале частот от 9 до 451 килогерц. Они обнаружили дисперсию в ультразвукаческих частотах (более ранние работы, где применялись частоты, не превосходящие 15 килогерц, дали отрицательные результаты); однако точное ее измерение затруднялось очень большой абсорбцией.

Подводя итоги имеющимся в настоящее время исследованиям поглощения ультразвуков в газах, можно сказать, что экспериментальные данные дают только качественное совпадение с теорией, что можно объяснить, с одной стороны, затруднительностью точных

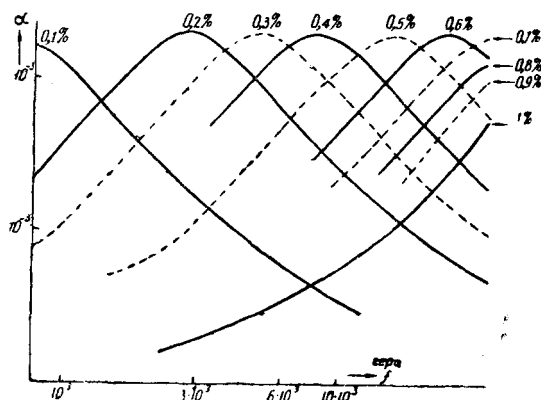


Рис. 16. Поглощение звуковой энергии в воздухе в зависимости от содержания водяных паров.

измерений подобного рода, с другой стороны — некоторым несовершенством теории. Несомненно, дальнейшее развитие этих исследований может дать ценные сведения о распределении внутримолекулярной энергии в сложных молекулах, о частоте возбуждаемости молекул, влиянии и характере соударений и т. д.

4. Действия мощных ультразвуковых колебаний

Для получения ультразвукаических колебаний большой мощности необходимо возбуждать пластинку значительной площади на ее собственной частоте, причем возбуждение следует по возможности усиливать; кварцевый осциллятор приходится погружать в изолирующую жидкость, чтобы ослабить электрическое поле на его краях и создать лучшие условия для передачи ультразвукаической энергии в окружающую среду и предохранить пластинку от излома при сильном возрастании амплитуды колебаний.

Первые исследования с мощными ультразвукаическими колебаниями принадлежат Вуду и Лумису⁹, доведившим напряжение на обкладках кварца до 50 kV. В этих условиях мощность ультра-

звуковой энергии, создаваемой кварцем, достигает десятков ватт на см^2 , причем действие столь мощного потока оказывается весьма интересным. Опыты Вуда и Лумиса неоднократно описывались (см. например П. Беликов, Успехи физ. наук VIII, 222, 1928); поэтому мы не будем на них останавливаться, а перейдем к рассмотрению более поздних работ.

а) Механические действия. Механические действия ультразвуковых колебаний проявляются прежде всего в выделении пузырьков газа, растворенного в жидкости, пронизываемой пучком ультразвуковых волн. Пузырьки начинают выделяться⁶⁹ уже при ничтожных мощностях (порядка сотых ватта на см^2) и, как указывалось выше, служат удобным средством для определения длины стоячих волн. При увеличении энергии ультразвукового потока выделение пузырьков газа усиливается; но при очень интенсивных потоках, когда амплитуда колебаний пузырьков чрезмерно возрастает, они снова распыляются; это было доказано Хопвудом³. Благодаря громадным ускорениям, получаемым на границе разнородных сред, под действием ультразвуковых колебаний возможно размельчение различных веществ и образование эмульсий. Получающиеся эмульсии оказываются высокодисперсными и весьма устойчивыми. Изучением эмульсионного действия занимались Ричардс⁷⁵, Даниевский⁷⁶ и др. Даниевский получал эмульсию воды и керосина при частотах 150, 395 и 1 160 килогерц. Он нашел, что количество ежесекундно образуемой эмульсии возрастает пропорционально увеличению интенсивности ультразвуковых колебаний, причем коэффициент пропорциональности зависит от частоты колебаний, так же как и минимальная интенсивность, при которой начинается образование эмульсий.

Клаус⁷⁷, работавший при частотах от 100 до 500 килогерц, получал при помощи ультразвуковых колебаний фотографические эмульсии. При достаточно большой интенсивности ему удалось добиться увеличения однородности и стабильности эмульсий. Светочувствительность полученных эмульсий также оказалась несколько выше нормальной. Эмульгирующая способность ультразвукового потока неизменной частоты была использована Ричардсом⁷⁵ в качестве измерителя мощности потока.

б) Химические действия. Изучение химических воздействий ультразвуковых колебаний усложняется благодаря тому, что отделение этого эффекта от теплового эффекта, обусловленного поглощением ультразвуковой энергии, во многих случаях оказывается затруднительным. Кроме того, необходимо исключить возможное влияние электрического поля кварцевого осциллятора. Последнее достигается удалением сосуда с исследуемым веществом от осциллятора и металлизированием его.

Ричардс и Люмис⁷⁸, одними из первых начавшие изучение химических действий, отметили влияние ультразвуковых колебаний на температуру кипения некоторых предварительно обезгаженных веществ, на рекристаллизацию пересыщенных растворов, испа-

рение перегретых жидкостей и ряд других химических явлений. Шмит, Джонсон и Ольсен⁷⁹ нашли, что под действием ультразвуков ускоряется окисление различных водных растворов солей. Они приписали его действию перекиси водорода, образующейся в воде благодаря влиянию ультразвукового пучка на растворенный в ней кислород. Их предположение было подтверждено работами Бете⁸⁰, работавшего при мощности около 250 W. Бете обнаружил также, что растворенные в воде O_2 и N_2 под действием ультразвука диссоциируют.

Чент-Жоржи⁸¹ и Чалай⁸² обнаружили распад высокополимерных молекул под действием ультразвука, причем это расщепление нельзя объяснить только тепловым воздействием.

При ориентировочных измерениях электропроводности некоторых растворов, подвергшихся воздействию ультразвука, втором настоящей статьи в 1931 г. были обнаружены изменения электропроводности; однако величина их была незначительна, так что нельзя было с определенностью заключить, что эти изменения вызваны ультразвуковым воздействием, а не являются результатом побочных эффектов (в частности обезгаживающего); то же относится и к изменению коэффициента внутреннего трения этих растворов. К сожалению, эти опыты не могли быть продолжены.

в) Биологические действия. Биологическое действие ультраакустических колебаний большой мощности впервые наблюдали Вуд и Лумис^{9, 93}. В дальнейшем этому вопросу был посвящен целый ряд работ.

Не останавливаясь на детальном рассмотрении полученных результатов (довольно подробную сводку этих работ см. в конце статьи Гроссмана¹), укажем, что значительная часть их объяснена механическим действием ультраакустических волн, обусловленным громадными ускорениями, создающимися на границе двух сред с различными акустическими плотностями при прохождении ультраакустической волны. Целый ряд мелких живых организмов разрушается под действием ультразвуков. При достаточной мощности удается вызвать смерть более крупных объектов (головастики, молодые аксолотли, мелкие рыбки и т. д.). При воздействии на подобные объекты обычно замечаются беспокойное поведение объектов и стремление удалиться от стенок сосуда; в дальнейшем, очевидно, наступает повреждение нервной системы, объект становится в необычное положение (например рыбки становятся вниз головой) и в конце концов погибает. Интересно отметить, что при небольших, но достаточных для вызывания смерти мощностях микроскопическое исследование тканей объекта не дает никаких результатов; причина гибели объекта и повреждения, созданные ультраакустическими волнами, остаются невыясненными⁹¹.

Гарвей и Лумис⁸³, изучавшие действие ультраакустических колебаний под микроскопом, пришли к заключению, что действие ультразвуков имеет чисто механический характер, даже если речь идет о клетках, размеры коих значительно меньше длины волны.

Их заключение оспаривалось Джонсоном⁸⁴, который доказывал, что влияние ультразвуковых волн объясняется образованием пузырьков газа, растворенного в жидкости, в частности кислорода.

При очень больших мощностях ультразвука колебания оказывают смертельное действие и на более крупные объекты; так Хупвуд³ и Вуд⁹ убивали ультразвуком путем лягушек.

Гайнс¹⁶, получавший мощные ультразвуковые колебания при помощи магнитострикционного вибратора, также наблюдал ряд биологических эффектов. В частности он отмечает задержку роста семян, подвергнутых действию ультразвукового пучка (впрочем, в других случаях рост семян ускорялся на 20—25%. Кроме того, ультразвуковые колебания оказывают бактерицидное действие; в частности молоко, облученное достаточно мощным пучком, свертывается значительно медленнее, чем контрольное, не подвергнутое облучению.

Несомненно, мощные ультразвуковые колебания могут сыграть известную роль в изучении биологических и химических процессов, поскольку в ультразвуковом поле удастся получить колоссальные ускорения, которые нельзя создать никаким другим образом. Однако для получения значительных эффектов, повидимому, необходима довольно большая мощность ультразвуковых колебаний; для создания ее требуется сложная, дорого стоящая аппаратура и хорошие, монокристаллические пластинки кварца значительной площади. Эти обстоятельства не позволяют широко развернуть исследования биологического действия ультразвуковых колебаний, в которых до настоящего времени сделаны только первые, робкие шаги.

В заключение следует упомянуть о работе Фрейндлиха, Золльнера и Роговского⁸⁵, предложивших воспользоваться ультразвуковыми колебаниями при терапии заболеваний спинного мозга, используя выделяющееся при поглощении ультразвуковых колебаний тепло одновременно с прогреванием организма токами высокой частоты (диатермия), и об использовании ультразвуковых колебаний для лечения заболеваний уха^{15, 86}.

5. НЕКОТОРЫЕ ПРИМЕНЕНИЯ ПЬЕЗОКВАРЦА

Помимо получения ультразвуковых колебаний и стабилизации радиопередатчиков и измерительных схем пьезокварц может быть использован в качестве измерителя давлений; для этой цели к кварцу приключается соответствующая электрическая схема с автоматической регистрацией напряжений, получающихся на обкладках кварца при его деформациях. Благодаря способности следовать за очень быстрыми изменениями давления подобный прибор позволяет изучать очень быстро протекающие процессы, как, например, изменения давления в цилиндрах двигателей внутреннего сгорания или давление в дуле орудия во время выстрела⁸⁸.

Другим применением является кварцевый осциллограф, сконструированный Филипповым⁸⁷. Он состоит из двух кварцевых пластинок

размером $70 \times 20 \times 0,7$ мм³, сложенных по своей ширине под некоторым углом. К соприкасающимся краям при помощи сильной пружины F прижимается зеркальце S ; противоположные края пластин закреплены неподвижно (рис. 17). Широкие поверхности пластин снабжены электродами E , к которым подводится измеряемое напряжение. При напряжении около 5 кВ деформация пластин достигала 1 м и определялась по смещению светового зайчика.

В интервале от 5 до 1200 герц чувствительность осциллографа оказалась совершенно независимой от частоты (собственная частота всей системы осциллографа — около 20 килогерц) и равной 135 В/мм. Потребляемая мощность ничтожна — 0,4 ВА. Практически оказа-

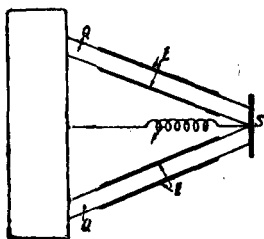


Рис. 17. Пьезоэлектрический осциллограф Филлипса.

лось возможным пользоваться осциллографом для регистрации процессов с частотой до 8000 герц, так как только при дальнейшем увеличении частоты изменение чувствительности делается значительным. Габариты пьезоэлектрического осциллографа значительно меньше габаритов шлейфового или катодного осциллографа.

6. ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЧАСЫ

Кварцевые часы, служащие для точного измерения времени и частоты, были сконструированы Шейбе и Адлерсбергером⁸⁸

в Германском государственном физико-техническом институте. Кварцевые часы состоят из генератора, возбуждающего кварцевую пластинку (частота — 60 000 герц), заключенную в вакуированный сосуд и помещенную в специальный двойном термостате; температура внутреннего термостата, содержащего кварц, поддерживается постоянной с точностью до $0,002^\circ\text{C}$. Электромагнитные колебания генератора, содержащего кварц, передаются на усилитель, где происходит усиление, достаточное для того, чтобы отсасывание энергии от усилителя не могло вызвать заметных изменений в режиме генератора. Колебания с усилителя поступают на трехкаскадный делитель частоты, позволяющий последовательно получить частоты в 10 000, 1 000 и 333 герца.

Последняя частота подается на синхронный моторчик специальной конструкции, совершающий около 5 об/сек. На оси ротора мотора имеется зубчатка, вызывающая через определенные промежутки времени (4,5 или 9,0 сек.) замыкание цепи регистрирующего механизма, записывающего черточки на бумаге, движущейся со скоростью 10 мм/сек. Положение отметок времени может быть отсчитано с точностью до 0,001 сек.

Часы питаются от сети переменного тока, потребляя в сутки около 3 кВт·ч. Частоты 10 000, 1 000 и 333 герц при посредстве катушек связи могут подаваться с работающих часов на различную измерительную аппаратуру, где эти частоты являются эталонными.

В 1932 г. действовало два экземпляра часов. Анализ их шестимесячной работы показал, что постоянство их работы исключительно велико и определяется следующими величинами.

За 24 часа постоянство хода сохраняется с точностью до $\pm 0,001$ сек., что соответствует постоянству частоты до $\pm 1 \cdot 10^{-8}$ ее значения. В течение полугода постоянство хода составило $\pm 0,002$ сек., что соответствует постоянству частоты с точностью до $\pm 2 \cdot 10^{-8}$. Непосредственное сравнение обоих часов показало, что их ход друг относительно друга сохраняет постоянство с точностью до $\pm 0,0003$ сек., что соответствует постоянству частоты до $\pm 4 \cdot 10^{-9}$.

Подробный анализ возможных влияний, обуславливающих изменения хода часов, привел Шейбе и Адлерсбергера к новой усовершенствованной конструкции кварцевых часов, в которой были приняты меры к уменьшению температурного коэффициента кварца и поддержанию постоянства питающих напряжений. Были построены еще два экземпляра кварцевых часов; эксплуатация их в течение последних 9 мес. показала, по мнению их конструкторов, такое совершенство конструкции, что в ближайшие годы весьма мало вероятно внесение в нее каких-либо существенных изменений. С этим мнением охотно можно согласиться, ознакомившись (по описанию часов) с поразительной продуманностью конструкции и предусмотрительностью ее авторов.

Д о б а в л е н и е

В докладе на сессии Академии Наук СССР 20 декабря 1934 г. С. Я. Соколов (Ленинград) сообщил ряд весьма интересных данных о своих работах по изучению ультразвуковых колебаний очень большой мощности.

Пользуясь излучателями большой площади, состоящими из многих склеенных друг с другом кварцевых пластин (мозаика), ему удалось повысить мощность ультразвукового излучения до 150 ватт. При распространении такого пучка, создаваемого излучателем с поверхностью около 1000 см^2 , в сосуде с маслом в вертикальном направлении, на поверхности масла образуется фонтан высотой в несколько десятков см.

Направляя такой мощный пучок в металлическую болванку, удается проследить распространение его в слое металла толщиной в 1 м, благодаря чему подобная „ультразвуковая дефектоскопия“ приобретает исключительную практическую ценность.

При получении дифракции света в столь мощном ультразвуковом пучке Соколову удалось наблюдать спектры до 34 порядка; изменение числа спектров при помещении на пути ультразвукового пучка металлической болванки позволяет судить о наличии дефектов внутри нее, причем этот способ оказывается весьма удобным.

Соколову удалось возбудить свои излучатели даже на очень высокой частоте — удалось получить дифракционные спектры

при частоте $1,2 \cdot 10^8$ герц, то есть при длине электромагнитной волны, равной 2,5 м; до сих пор попытки получения достаточно мощных колебаний столь высокой частоты были безрезультатны.

Пропуская мощный ультразвуковой пучок через расплавленные металлы. Соколов обнаружил уменьшение времени затвердевания охлажденного металла, достигавшее в некоторых случаях 30%. Так как при этом кристаллическая структура оказывалась значительно более мелкой, чем при нормальном затвердевании, то этот факт является весьма интересным для металлургии.

Наконец следует упомянуть также о результатах исследований Соколова над распространением ультразвуковых колебаний по проволоке. Подводя ультразвуковые колебания ничтожной мощности (всего несколько десятых ватта) к стальной проволоке в 6 мм диаметром, ему удалось проследить их распространение по проволоке на расстоянии до 500 м. Для обнаружения колебаний применялась кварцевая пластинка с двумя электродами, с которых напряжение подавалось на усилитель с небольшим коэффициентом усиления. Принимая во внимание возможность питания проволоки большой ультразвуковой мощностью, пользование более мощным усилителем и возможность модуляции ультразвуковых колебаний, Соколов приходит к заключению о применимости ультразвуковых колебаний для связи на расстояния порядка сотен километров.

Преимуществом подобного рода „ультразвуковой сигнализации“ является невозможность подслушивания наблюдателем, не прикасающимся непосредственно с проволокой и устранение затруднений с изоляцией, возникающих при электрической проволоочной связи. Некоторым недостатком является требование однородности проволоки по всей ее длине и необходимость избегать резких изгибов ее, так как обе причины ухудшают условия распространения ультразвуковых колебаний.

ЛИТЕРАТУРА

1. Grossmann, *Ultraschall-Handb.d. Exper. Phys.*, B. **17**, 1, 461, 1934.
2. W. Rodewald, *Z. techn. Phys.* **15**, 192, 1934.
3. F. L. Hoopwood, *Nature*, **128**, 748, 1931; *Journ. Schient. Inst.* **6**, 34, 1929.
4. J. C. Hubbard, *Journ. Ac. Soc. Amer.* **4**, 99, 1932.
5. L. Bergmann, *Phys. Z.* **34**, 761, 1933.
6. Gerald, Fox a. Underwood, *Physics* **4**, 10, 1933.
7. Л. Мясников, *Журн. техн. физ.* **II**, 125, 1932.
8. P. Langevin, *La Nature* **5**, 1925.
9. R. Wood a. A. Loomis, *Phil. Meg.* **4**, 417, 1927.
10. Н. Малов, *Успехи физич. наук IX*, 859, 1929.
11. Н. Малов, В. Митяев и С. Ржевкин, *Сборник, посвященный 10-летию Моск. магнит. лаборат.*, Москва, 1930.
12. G. W. Pierce, *Proc. Am. Acad.* **63**, 1, 1928.
13. K. Ch. Black, *Proc. Am. Acad.* **63**, 49, 1928.
14. Л. Фрейман, *Телегр. и телефон. без проводов*, № 3, 1929.
15. Е. Копилов, *Українські фізичні записки II*, 19, 1928; **II**, 49, 1931.

16. Newton Gaines, *Physics* **3**, 209, 1932; *Phys. Rev.* **37**, 109, 1931.
17. Л. Томилина, *Вестник электротехники* **1**, 144, 1930.
18. G. W. Pierce, *Proc. Am. Acad.* **60**, 271, 1925.
19. Pan Tcheng Kao, *Ann. d. Phys.* **17**, 315, 1932.
20. W. H. Pielemeier, *Phys. Rev.* **38**, 1236, 1931; **37**, 1682, 1931.
21. C. D. Reid, *Phys. Rev.* **35**, 814, 1930; **37**, 1147, 1931.
22. J. C. Hubbard, *Phys. Rev.* **36**, 1668, 1930.
23. H. Kröncke, *Phys. Z.* **31**, 908, 1930; **33**, 733, 1932.
24. K. Bücks und H. Müller, *Z. Physik* **84**, 75, 1933.
25. E. P. Tawill, *C. r.*, 191: 92, 168, 998, 1930.
26. V. Petržílka und L. Zachoval, *Z. Physik* **90**, 700, 1934.
27. H. Jagi and S. Matmo, *Rep. Radio Res. Japan* **2**, 287, 1932.
28. T. Abello, *Proc. Nat. Acad. Am.* **13**, 699, 1927; *Phys. Rev.* **31**, 158, 1928.
29. T. Abello, *Phys. Rev.* **31**, 1083, 1928.
30. E. Grosmann, *Ann. d. Phys.* **13**, 681, 1932.
31. J. C. Hubbard a. A. L. Loomis, *Phil. Mag.* **5**, 1177, 1928; *Phys. Rev.* **31**, 158, 1928; *Nature* **120**, 189, 1927.
32. A. Meissner, *Z. techn. Phys.* **7**, 585, 1926.
33. H. Osterberg, *Phys. Rev.* **43**, 819, 1933.
34. H. Straubel, *Phys. Z.* **34**, 894, 1933; **35**, 179, 1934.
35. Н. Малов, *Ж. Технич. физики*, III, 1259, 1933; *Hochfrequ. u. Elektroak.* **42**, 115 1933.
36. R. W. Boyle, J. F. Lehmann a. C. D. Reid, *Trans. Roy. Soc. (Canada)* III, 19, 137, 1925; III, 22, 371, 1928.
37. R. W. Boyle a. J. F. Lehmann, *Phys. Rev.* **27**, 518, 1926.
38. Н. Малов и С. Ржевкин, *Ж. Техн. физики* III, 155, 1933; *Hochfrequ. u. Elektroak.* **40**, 134 1933.
39. W. T. Richards, *Proc. Nat. Acad. Am.* **15**, 310, 1929.
40. S. Sokoloff, *E. N. T.* **6**, 454, 1929.
41. W. T. Richards, *Science* **76**, 36, 1932.
42. E. Klein a. W. Hershberger, *Phys. Rev.* **37**, 760, 1931.
43. R. Lucas et P. Biquard, *C. r.* **194**, 2132, 1932; **195**, 121, 1932.
44. P. Debye a. F. Sears, *Proc. Nat. Acad. Sci.* **18**, 409, 1932.
45. P. Brillouin, *Diffraction de la lumière par des ultrasons*, Paris, 1933.
46. P. Debye, *Phys. Z.* **33**, 849, 1932; см. также *Успехи физич. наук* **14**, № 7, 1934.
47. P. Biquard, *C. r.* **196**, 257, 1933; **197**, 309, 1933.
48. L. Bergmann, *Z. Hochfrequ.* **48**, 83, 1934.
49. Bär u. Meyer, *Phys. Z.* **34**, 393, 1933.
50. E. Hiedemann u. H. Asbach, *Phys. Z.* **34**, 734, 1933.
51. C. Bachem, E. Hiedemann u. H. Asbach, *Z. Physik* **87**, 734, 1934.
52. H. Asbach, C. Bachem u. E. Hiedemann, *Z. Physik* **88**, 395, 1934.
53. E. Hiedemann, H. Asbach u. K. Hoesch, *Z. Physik* **90**, 322, 1934.
54. R. W. Boyle a. D. O. Sproule, *Nature* **123**, 13, 1929.
55. H. Dörffler, *Z. Physik* **63**, 30, 1930.
56. K. Rörich, *Z. Physik* **73**, 813, 1932.
57. G. S. Field, *Nature* **128**, 117, 1931.
58. R. W. Boyle, *Canad. Journ. Res.* **1**, 405, 1929; **2**, 1, 1930; *Trans. Roy. Soc. (Canada)* III, 21, 115, 1927.
59. R. W. Boyle, *Nature* **120**, 476, 1927; *Trans. Roy. Soc. (Canada)* III, 22, 371, 1928; III, 21, 79, 1927; III, 23, 187, 1929.
60. G. Taylor a. D. Sproule, *Trans. Roy. Soc. (Canada)* III, 23, 91, 1929.
61. C. Randall, *Bur. of Stand. Journ. Res.* **8**, 79, 1932.
62. P. Biquard, *C. r.* **193**, 226, 1931.
63. Y. Rocard, *Journ. Phys. et. le Radium* (7) **1**, 126, 1930.
64. H. O. Kneser, *Ann. d. Phys.* **11**, 761, 1931; **16**, 347, 360, 1933; **11**, 777, 1931.

65. K. F. Herzfeld a. F. O. Rice, Phys. Rev. **31**, 691, 1928.
66. W. T. Richards, Journ. Chem. Phys. **1**, 863, 1933.
67. A. Einstein, Sitz. Berich. Berl. Acad. Mathem. Kl., 380, 1920.
68. Palaiolagas, Z. Physik **12**, 375, 1923.
69. W. H. Pielemeier, Phys. Rev. **41**, 833, 1932; **42**, 434, 1932; **36**, 1005, 1930.
70. W. T. Richards a. J. A. Reid, Journ. Chem. Phys. **1**, 73, 114, 1933; **2**, 193, 1934; **2**, 212, 1934.
71. G. F. Barness, Journ. Acoust. Soc. Am. **3**, 579, 1932.
72. H. O. Kneser, Journ. Acoust. Soc. Am. **5**, 122, 1933.
73. W. O. Knudsen, Journ. Acoust. Soc. Am. **3**, 126, 1931; **5**, 112, 1933.
74. Ch. E. Teeter, Journ. Chem. Phys. **1**, 251, 1933.
75. W. T. Richards, Journ. Am. Chem. Soc. **51**, 1724, 1929.
76. W. Daniewsky, Acta Phys. Polon. **2**, 45, 1933.
77. B. Claus, Z. techn. Phys. **15**, 74, 1934.
78. W. T. Richards a. A. L. Loomis, Journ. Am. Chem. Soc. **49**, 3086, 1927.
79. K. O. Schmidt, C. H. Jonson a. A. R. Olson, Journ. Am. Chem. Soc. **51**, 370, 1929.
80. H. Beute, Z. physik. Chem. (A) **163**, 161, 1933.
81. A. Szent-Gyorgyi, Nature **131**, 278, 1930.
82. A. Szalay, Phys. Z. **35**, 293, 1934.
83. E. N. Harvey a. A. L. Loomis, Nature **121**, 622, 1928.
84. C. H. Jonson, Journ. Physiologie **67**, 356, 1929.
85. H. Freundlich, K. Sollner u. F. Rogowski, Klin. Wochenschr. **11**, 1512, 1932.
86. Z. f. Hals, Nasen u. Ohrenheilkunde **31**, 490, 1932; **34**, 237, 1934.
87. W. Philippoff, ETZ **53**, 405, 1932.
88. A. Scheibe u. V. Adlersberger, Hochfrequ. u. Elektroak, **43**, 37, 1934; Phys. Z. **33**, 235, 1932.
89. Cl. Schaefer u. L. Bergmann, Berlin. Bericht., S. 155 и 192, 1934.
90. R. Wyss, Helv. Phys. Acta **7**, 406, 1934.
91. Н. Малов и В. Троицкий, Доклад на конференции Ин-та рентгенологии, Москва (работа в печати не появлялась).
92. E. Johnson, Phys. Rev. **45**, 641, 1934.
93. R. W. Wood, Доклад на интернац. конгрессе по электрорадио-биологии, Болонья, сентябрь 1934 г.
94. H. Müller und T. Kraeft, Phys. Z. **33**, 305, 1933.
95. E. Hiedemann und E. Seifen, Z. Phys. **91**, 413, 1934.
96. Gino Sacerdote, Alta Frequenza **2**, 516, 1933.
97. Шпаковский, Докл. Акад. наук, III, 588, 1934.
98. J. Kluge und H. Link, Forsch. aus dem Gebiete d. Ingenieurwesens **4**, 177, 1933.
99. А. И. Даниленко. Журн. Технич. Физики IV, 1608, 1934.