

Б. Б. КУДРЯВЦЕВ

ПРОСТЫЕ
ОПЫТЫ
С УЛЬТРАЗВУКАМИ



УЧПЕДГИЗ 1954

Б. Б. КУДРЯВЦЕВ

ПРОСТЫЕ ОПЫТЫ С УЛЬТРАЗВУКАМИ

ПОСОБИЕ ДЛЯ УЧИТЕЛЯ

ГОСУДАРСТВЕННОЕ
УЧЕБНО-ПЕДАГОГИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
МИНИСТЕРСТВА ПРОСВЕЩЕНИЯ РСФСР

МОСКВА — 1954

О Г Л А В Л Е Н И Е

| | <i>Стр.</i> |
|--|-------------|
| Введение | 3 |
| Глава 1. Ультразвуки и их применение | 8 |
| Глава 2. Методы получения ультразвука | 24 |
| Глава 3. Как обнаружить ультразвуковые волны | 48 |
| Глава 4. Измерение скорости и поглощения ультразвука | 61 |
| Глава 5. Основные свойства ультразвуков | 78 |
| Глава 6. Применение ультразвуков в физико-химических исследованиях | 97 |

Редактор *В. М. Дуков*

Техн. редактор *Н. Н. Махова*

Подписано к печати 24 декабря 1953 г. А 08355. Бумага 84×108^{1/2}.
Бумажных листов 1,813. Печатных листов 5,94. Учётно-изд. листов 4,6.
Тираж 30 тыс. экз.

Цена без переплёта 1 р. 25 к. Переплёт 50 к.

Отпечатано в 3 типогр. ЛРТПП, г. Рига, ул. Ленина 137/139.

ВВЕДЕНИЕ

Ультраакустика — сравнительно молодой отдел физики. В лабораториях ультразвуки начали получать на рубеже прошлого и нашего веков. Только в конце второго десятилетия нашего века были созданы источники мощных ультразвуковых колебаний.

Уже первые опыты с мощными ультразвуковыми волнами привлекли к ним внимание исследователей, работающих в областях, смежных с физикой. Успешное применение ультразвуков в самых различных отраслях науки и техники привело к тому, что ими в наше время интересуются не только физики, но и химики, биологи, медики, инженеры.

Впервые ультразвуки были применены в лабораторных исследованиях замечательным русским физиком Петром Николаевичем Лебедевым.

Основополагающие работы в области практического применения ультразвуковых волн принадлежат замечательному французскому физiku Полю Ланжевону.

Наши отечественные учёные идут в первых рядах исследователей ультразвука, отыскивая всё новые и новые способы его практического использования.

Именно в Советском Союзе зародился и был доведён до совершенства наиболее чувствительный метод обнаружения изъянов в различных изделиях — ультразвуковая дефектоскопия. Этим достижением наука обязана работам талантливого советского учёного, лауреата Сталинской премии С. Я. Соколова.

Оригинальные и разнообразные исследования химических, механических, биологических действий ультразвука были выполнены С. Н. Ржевкиным, его сотрудниками и учениками.



П. Н. Лебедев

Ценный вклад в развитие теоретической ультраакустики был сделан М. Леонтовичем и Л. Мандельштамом, формулировавшими релаксационную теорию дисперсии ультразвука, С. М. Рытовым — его работами по теории дифракции света на ультразвуке, А. С. Предводителевым, успешно развивающим свои оригинальные взгляды на процесс распространения звука, и другими.

Если обратиться к экспериментальному изучению распространения звука, то необходимо будет назвать систематические исследования, посвящённые скоростям и поглощению ультразвука, выполненные И. Г. Михайловым и его сотрудниками, работы В. Ф. Ноздрёва, его учеников и сотрудников, первыми изучивших распространение звука в жидкостях во всём интервале температур, соответствующих жидкому состоянию, исследования П. Бажулина, В. Тарасова и многих других.

Имена упомянутых выше исследователей составляют лишь небольшую долю в общем списке советских ультраакустиков, и мы привели их только для того, чтобы проиллюстрировать широкий размах ультраакустических исследований, ведущихся в Советском Союзе. Однако нам представляется, что имеется одна область, в которой воз-



П. Ланжевен

возможности, предоставляемые ультраакустическими методами, используются далеко не в полной мере. Этой областью является преподавание физики как в средней, так отчасти и в высшей школе. А ведь ультразвуки могут оказать большую помощь педагогу. Ультразвуковой луч легко сделать видимым и получить его изображение на экране. Этим можно воспользоваться для того, чтобы продемонстрировать основные свойства волн, присущие последним вне зависимости от их природы. Действительно, направив ультразвуковой луч на границу раздела двух сред, можно показать на экране преломление луча. Подбирая различные комбинации жидкостей, можно подтвердить связь, существующую между показателями преломления и скоростями распространения волны в тех средах, на границе которых происходит преломление. Столь же несложно изготовить призму и продемонстрировать ход звукового луча в ней.

Естественным дальнейшим шагом явится демонстрация хода луча в акустической линзе. Действие линзы можно очень эффектно показать, получив при помощи фокусированного луча ультразвуковой фонтан на поверхности жидкости. Всё это даст возможность учителю рассказать



С. Н. Ржевкин

об ультраакустической оптике, успешно развиваемой учёными Советского Союза.

Если расположить на пути ультразвуковой волны экраны с отверстиями различной формы и размеров, то можно продемонстрировать дифракцию звуковой волны. Очень хорошо получается картина дифракции, если на пути волны поместить небольшой цилиндр. Меняя диаметр цилиндрика, можно наблюдать как появление акустической тени в тех случаях, когда длина волны мала по сравнению с диаметром цилиндра, так и полное огибание цилиндрика, когда его диаметр достаточно мал. В ходе этой демонстрации можно объяснить учащимся значение ультразвуков при изучении акустических свойств проектируемых сооружений на их уменьшённых моделях, рассказать о работах советских учёных С. Н. Ржевкина и С. Кречмера.

Большая мощность ультразвука делает лёгкой демонстрацию давления звуковой радиации. Одновременно с этим опытом можно рассказать о работах П. Н. Лебедева и о тех трудностях, которые ему пришлось преодолеть для доказательства существования светового давления.



С. Я. Соколов

Пользуясь ультразвуками, можно осуществить ещё целый ряд интересных и поучительных опытов. Вряд ли можно сомневаться в полезности включения в число демонстраций на уроках физики в школе и простых опытов с ультразвуками. Как мы постараемся показать дальше, многое в этой области не требует для своего осуществления сложной аппаратуры и может быть реализовано теми средствами, которые имеются в распоряжении школьного физического кабинета.

Ультраакустические опыты, несомненно, сделают ещё более увлекательной работу школьных физических кружков.

Высказанные соображения послужили побудительной причиной для написания этой небольшой книги.

ГЛАВА I

УЛЬТРАЗВУКИ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ

То, что мы называем звуком, представляет собой упругую продольную волну. Подобные волны могут распространяться в любом теле, хотя чаще всего мы имеем дело с распространением звуковых волн в воздухе. Отдельные частицы в звуковой волне совершают колебательные движения, в результате которых в веществе возникают чередующиеся области повышенного и пониженного давлений. Число колебаний, совершаемых частицами вещества в волне за 1 секунду, определяет частоту звуковой волны.

Чувствительность человеческого уха различна к звукам различной частоты. Это наглядно иллюстрирует ри-

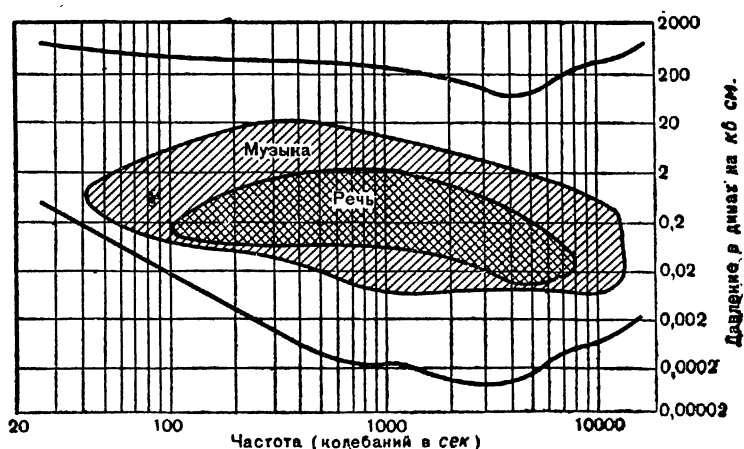


Рис. 1. Диаграмма восприятия звука человеческим ухом.

сунок 1, на котором вдоль оси абсцисс отложены частоты звука, а нижняя кривая соответствует порогу слышимости, т. е. самым слабым звукам, воспринимаемым человеческим ухом. Как легко убедиться, порог слышимости повышается в области звуков очень низкой и очень высокой частоты. Человеческое ухо не воспринимает как звук не только очень слабые, но и очень интенсивные колебания. Последние вызывают ощущение давления или боли. Интенсивность звуков, вызывающих ощущение боли, изображена на рисунке 1 верхней кривой. Между этими кривыми расположена область волн, воспринимаемых человеческим ухом как звуки.

Как видно, человеческое ухо перестаёт реагировать на звуки, частоты которых ниже 20 кол./сек. и выше 20 000 кол./сек. Неслышимые звуковые волны с частотами ниже 20 кол./сек. называются инфразвуками. Невоспринимаемые человеком звуки с частотами, большими 20 000 кол./сек., называют ультразвуками. Следует подчеркнуть, что деление упругих волн на воспринимаемые человеческим ухом, слышимые, звуки и невоспринимаемые инфра- и ультразвуки условно. Физическая природа слышимых звуков и ультразвуков одина, и деление их вызвано особенностями слухового аппарата человека. Многие животные, например собаки, кошки, летучие мыши, некоторые породы птиц и насекомых хорошо реагируют на ультразвуки. Больше того, даже для человека область ультразвуков не является точно определённой. Верхняя граница слышимых звуков изменяется с возрастом человека. Дети способны воспринимать звуки более высокой частоты, чем люди преклонного возраста.

Многие на первый взгляд необычные действия ультразвука объясняются их большой интенсивностью. В последние годы, когда были разработаны способы получения очень мощных слышимых звуков, удалось с их помощью воспроизвести большинство эффектов, которые, как считалось раньше, составляли отличительную особенность ультразвука.

Однако некоторые действия присущи только ультразвукам. Кроме того, получение ультразвуков проще, чем получение слышимых звуков той же мощности. Этим объясняется интерес, проявляемый к использованию ультразвуков работниками различных отраслей науки и техники. Число научных работ, посвящённых изучению свойств

и применению ультразвуков, исчисляется несколькими тысячами.

Эта книга посвящена описанию простых способов получения ультразвуков и тем несложным демонстрациям их основных свойств, которые можно осуществить, пользуясь оборудованием школьного физического кабинета. Прежде чем приступить к описанию того, как построить ультразвуковой генератор, посвятим несколько страниц описанию особенностей ультразвуков и некоторых особенно интересных явлений, наблюдаемых при их распространении.

Первое практическое применение ультразвуков было связано с их способностью распространяться сравнительно узким пучком. Это свойство объясняется тем, что направленность излучения зависит от соотношения между размерами излучателя и длиной волн. Чем меньше длина волны по сравнению с размерами излучателя, тем более направленным будет излучение.

Так же ведёт себя волна, проходя через отверстие в экране, расположенном на её пути.

На рисунке 2 показано, как распространяется волна в том случае, когда её длина меньше отверстия (а) и когда она превосходит его (б).

Возможностью получить сравнительно узкий ультразвуковой пучок, который можно по желанию посылать в выбранном направлении, воспользовался французский физик П. Ланжевен при устройстве прибора, пред-

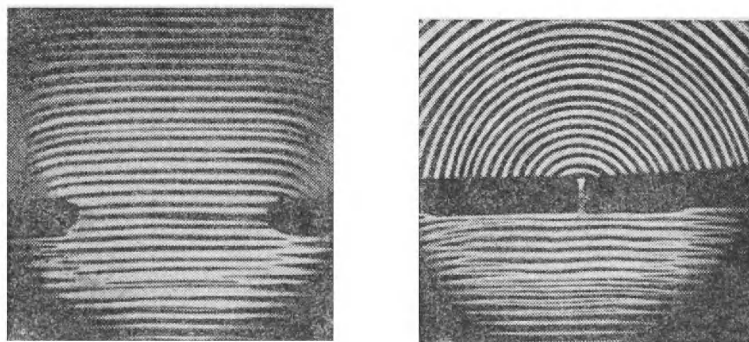


Рис. 2. Прохождение плоских волн через отверстие:

(а) — большое по сравнению с длиной волны.

(б) — малое по сравнению с длиной волны.

назначенного для обнаружения подводных лодок. В созданном им ультразвуковом гидролокаторе специальный излучатель посылал под водой короткий ультразвуковой сигнал, последний бежал в виде узкого луча вперёд и если не встречал на своём пути препятствий, то терялся в океане. Если же на пути сигнала встречалось препятствие, то он отражался и в виде эхо бежал обратно. Приход эхо регистрировался специальным прибором и служил указанием о наличии в море препятствия. Зная время, прошедшее между посылкой сигнала и приходом эхо, можно определить расстояние до обнаруженного препятствия. Если направить ультразвуковой сигнал вертикально вниз, то подобным прибором можно измерять глубину моря — это будет ультразвуковой эхолот. Эхолот позволяет очень точно измерять рельеф морского дна. На рисунке 3 приведена запись контура дна океана от Ламанша до побережья Флориды.

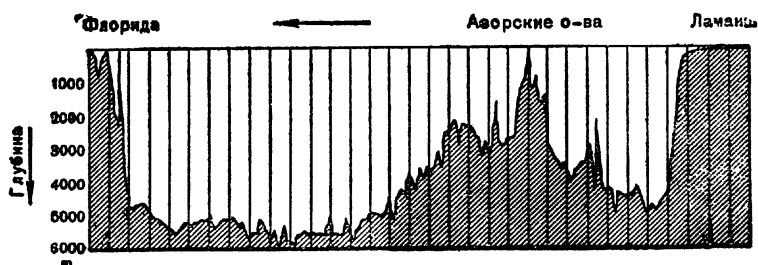


Рис. 3. Профиль дна Атлантического океана, измеренный при помощи ультразвукового эхолота.

В последние годы ультразвуковые эхолоты с успехом применяют в практике рыболовства. Ультразвуковая разведка рыбных косяков позволяет значительно сократить продолжительность рыболовной экспедиции и повысить улов рыбы. На рисунке 4 изображена запись косяка сельди, произведённая с помощью ультразвукового локатора. Ультразвуковые эхолоты обычно автоматически регистрируют наблюдения.

Особенно большое внимание привлекла к ультразвукам их способность вызывать химические превращения. Как оказалось, ультразвуки способны в одних случаях окислять, а в других восстанавливать вещества. Из окис-

лительных процессов, вызываемых ультразвуком, особенно хорошо изучено разложение йодистого калия. Озвучивание слегка подкислённого раствора йодистого калия с крахмалом вызывает появление синей окраски в резуль-

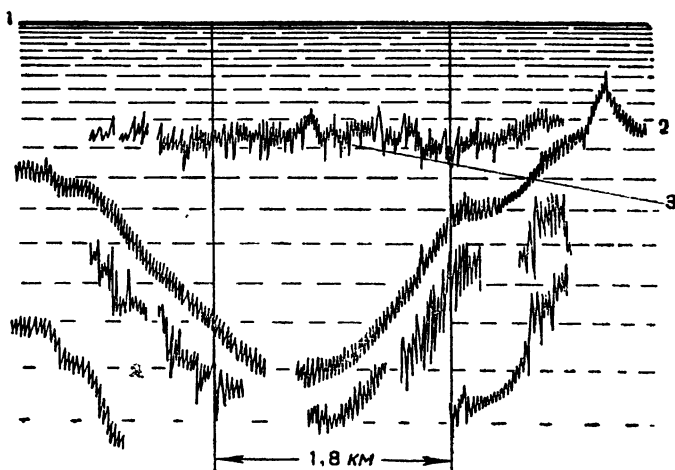


Рис. 4. Косяк сельди, обнаруженный с помощью ультразвукового эхолота. 1 — поверхность моря; 2 — дно моря; 3 — косяк рыбы.

тате взаимодействия выделившегося свободного йода с крахмалом. Чувствительность раствора к ультразвуковым колебаниям можно значительно повысить, если добавить к нему озвученной водной эмульсии четырёххлористого углерода.

В качестве примера вызываемой ультразвуком реакции восстановления можно привести превращение сулемы в колумель. При озвучивании раствор сулемы быстро мутнеет в результате образования плохо растворимой в воде колумели.

Что является причиной химических изменений, происходящих под действием ультразвука?

Ультразвуковая волна состоит из чередующихся сжатий и разрежений. В мощной волне, распространяющейся в воде, разрежения могут быть настолько значительны, что вода не выдерживает возникших напряжений и разрывается. Образуются мельчайшие пузырьки, наполненные парами воды и растворёнными в ней газами, — как

говорят, возникает кавитация. Возникшие пузырьки существуют очень недолго, после чего захлопываются и исчезают. Внутри пузырьков, помимо паров воды и газов, находятся мельчайшие капельки воды, которые отрываются от её поверхности в момент разрыва. Ряд фактов позволяет предполагать, что стенки кавитационного пузырька несут электрические заряды, противоположные тем, которые имеются на капельках, находящихся внутри него. При сжатии пузырька, в результате уменьшения его размеров электрическое напряжение сильно возрастает и между стенками кавитационного пузырька и капельками, находящимися внутри него, происходит разряд. Вероятно, этот электрический разряд и является главной причиной химических действий ультразвука.

Приходится признать в то же время, что вопрос о природе химического действия ультразвука более сложен, чем это иногда представляется. Согласно последним исследованиям, химические превращения возникают только при действии непрерывных ультразвуковых колебаний. Применяя для озвучивания ультразвуковые импульсы, не удаётся вызвать химических превращений даже в том случае, если средняя мощность их значительно превосходит ту мощность непрерывных колебаний, при которой наблюдаются химические превращения. Было высказано предположение о том, что в данном случае главную роль играют колебания воздушных пузырьков в возникшей в жидкости стоячей волне. При резонансе эти колебания могут сделаться очень интенсивными и сопровождаться изменениями давления, достаточно большими для того, чтобы вызвать химические превращения.

Химическое действие ультразвука было предложено использовать для получения изображения ультразвукового поля. Если в ванночку с водой, в которой распространяется ультразвуковая волна, опустить в темноте фотографическую пластинку, то на ней получится изображение ультразвукового луча, подобное приведённому на рисунке 5. На этом рисунке мы видим как бы вертикальный разрез ванночки, в которой распространяется ультразвук. Последний настолько интенсивен, что на поверхности воды возник даже небольшой фонтан. Ультразвуковые колебания вызвали почернение фотографической пластинки, пропорциональное их интенсивности. Расходящиеся веером тёмные полосы показывают, как распреде-

ляется интенсивность в распространяющемся в воде ультразвуковом луче. Это изображение получено при помощи особых «звучувствительных» пластинок, но может быть получено и при помощи обычных пластинок.

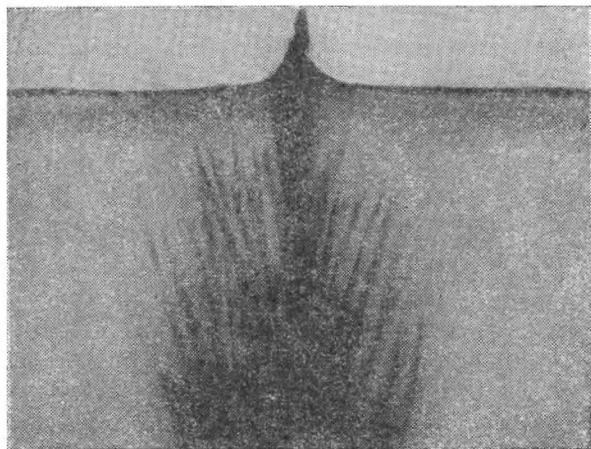


Рис. 5. Изображение ультразвукового поля, полученное в результате непосредственного действия ультразвука на фотопластинку.

В будущем большой практический интерес может представлять обнаруженная недавно способность ультразвука ускорять реакции полимеризации. Скорость полимеризации стирола и бутадиена значительно возрастает при озвучивании. Ускорение полимеризации может объясняться или действием образующихся при озвучивании радикалов, или же «разламыванием» макромолекул, при котором образуются «обломки», имеющие на концах ненасыщенные группы и потому способные к полимеризации.

Ультразвуки вызывают порой противоположные действия. Например, наряду с ускорением реакции полимеризации они способны вызывать и процесс деполимеризации. На рисунке 6 изображено изменение молекулярного веса полистирола при озвучивании. Рассматривая кривую, можно убедиться, что под действием ультразвука большие молекулы полистирола разламываются на более мелкие частицы.

Способность ультразвука измельчать вещество, не ограничивается частицами молекулярных размеров.

С его помощью мы можем раздробить любое жидкое и даже твердое тело.

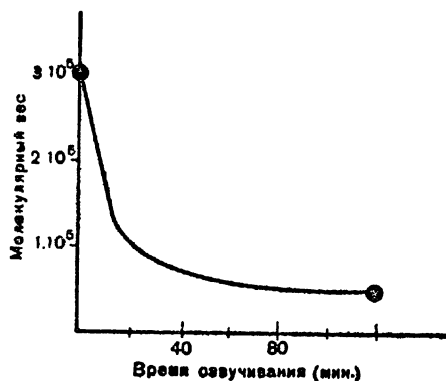


Рис. 6. Деполимеризация полистирола под действием ультразвука.

Ультразвуковое эмульгирование находит уже себе промышленное применение при приготовлении лекарственных препаратов, при обработке молока, при приготовлении фотографических эмульсий.

Природа ультразвукового диспергирования полностью не выяснена. Несомненно, здесь большую роль играют кавитационные пузырьки. Можно показать, что при захлопывании пузырьков возникают огромные давления, измеряемые тысячами атмосфер. Захлопывание пузырьков вызывает микроскопические удары, разрушающие диспергируемое тело. Кроме того, ультразвуковая волна, пронизывая частицу, вызывает появление сил, стремящихся её разорвать.

При эмульгировании большое значение имеют колебания, возникающие в стенках сосуда, содержащего эмульгируемую смесь. На рисунке 7 изображено, как происходит эмульгирование масла в воде при помощи ультразвука. Облачко, которое видно на фотографии, представляет собой образовавшуюся эмульсию. О быстроте эмульгирования можно судить по промежутку времени между отдельными кадрами. Последний кадр получен всего через 2 секунды после начала эмульгирования.

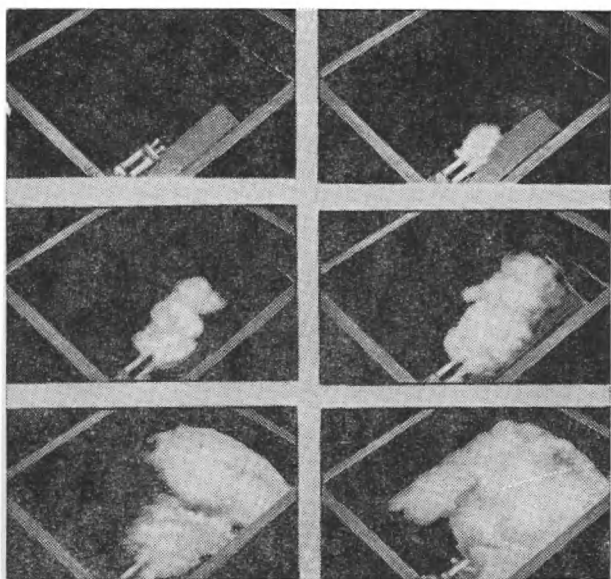


Рис. 7. Ультразвуковое эмульгирование масла в воде.

Ультразвуковое диспергирование с успехом применили при мойке шерсти. Обычно для удаления жира шерсть моют в мыльном растворе, содержащем большое количество щёлочи. При этом технологические свойства волокна ухудшаются. Применяя ультразвуковые колебания, можно производить мойку в почти нейтральном растворе. При этом одновременно уничтожаются различные микроорганизмы и отпадает необходимость дезинфекции, к которой иначе приходится прибегать.

Диспергирующее действие ультразвука даёт возможность производить спайку алюминиевых предметов обычным припоем. Без помощи ультразвука это не удаётся сделать в силу того, что поверхность алюминия всегда покрыта тонкой плёнкой окиси, которая не даёт возможности олову проникнуть к поверхности металла и образовать прочное сцепление спаиваемых деталей. Как показал опыт, спайку алюминиевых предметов можно осуществить обычным припоем, если в момент пайки подвергнуть спай действию мощных ультразвуковых колебаний. Это удаётся сделать при помощи специального па-

яльника, который одновременно является источником ультразвуковых колебаний.

Наряду с описанными действиями ультразвуки способны вызывать и противоположные эффекты, а именно—ускорять процесс коагуляции, т. е. укрупнять мелко раздроблённые частицы. При распространении ультразвуковой или звуковой волны между частичками дыма или тумана возникают силы притяжения, подобные тем силам, которые возникают между частицами в потоке. Кроме того, более крупные частички дыма или тумана в силу большей массы отстают в своих движениях от более мелких. В результате возрастает число соударений, ведущих к образованию крупных агрегатов. Звуковая коагуляция с успехом применяется в технике при улавливании сажи, содового и сернокислотного туманов и т. п.

Ультразвуки, несомненно, играют бóльшую роль в природе, чем предполагали до недавнего времени.

Особенно велика роль ультразвуков в жизни летучих мышей. Летучая мышь обладает плохим зрением. Как показали исследования, мыши ориентируются в полёте, издавая короткие ультразвуковые сигналы и следя за приходом эха этих сигналов. Достаточно заткнуть летучей мыши уши, чтобы она полностью потеряла способность ориентироваться.

Уже в первых опытах с ультразвуками было обнаружено, что различные микроорганизмы быстро погибают при озвучивании. Было даже предложено применить ультразвуки для обеззараживания воды и различных пищевых продуктов.

Прикрепив к микроскопу специальный фотографический аппарат, удалось заснять разрушение микроорганизмов под действием ультразвука. Опыт показал, что разрыв клеток протекает в десятитысячные доли секунды. Вероятно, причиной разрушения клеток является опять же кавитация. В некоторых случаях было достаточно повысить внешнее давление и тем прекратить возникновение кавитационных пузырьков для того, чтобы ультразвук уже не вызывал гибели клеток.

С помощью электронного микроскопа можно получить фотографии туберкулёзных бацилл, взвешенных в воде до и после озвучивания их. Фотографии эти показывают, что под действием ультразвука туберкулёзные палочки разрушаются.

Разрушительное действие ультразвука распространяется также и на вирусы. Вирус сыпного тифа значительно ослабляется даже при кратковременном озвучивании. Гриппозный вирус при озвучивании также теряет способность вызывать заболевание.

Быстрое разрушение клеток под действием ультразвука даёт возможность получать различные важные биологические вещества, такие, как токсины, ферменты, антигены и т. п., не вызывая в них химических изменений. С помощью ультразвука удалось приготовить сыворотки, сообщающие иммунитет к различным заболеваниям.

В некоторых случаях под действием ультразвука жизненные процессы могут ускоряться. Так, например, озвучивание семян гороха приводит к бурному развитию всего растения. Однако к подобного рода опытам надо относиться с большой осторожностью. Озвучивание мощным ультразвуком — очень сильное воздействие на организм, которое вызывает в нём ещё неизвестные нам изменения. О действии ультразвука на человеческий организм известно крайне мало.

Наиболее важным практическим применением ультразвуков является ультразвуковая дефектоскопия. Ультразвуковые волны, почти не ослабляясь, проходят значительные толщи металла, и в то же время сильно теряют в мощности в том случае, если на пути ультразвукового луча попадает даже совсем небольшая трещина. В одной из систем ультразвукового контроля качества изделий рабочий прикладывает ультразвуковой излучатель к одной из поверхностей исследуемого образца (рис. 8). К противоположной поверхности, как раз напротив излучателя, прижимается приёмник. Если в детали нет дефектов (рис. а), приёмник отмечает приход ультразвуковых колебаний: стрелка прибора отклоняется. Раковина, попавшая на пути распространения ультразвука, вызовет рассеяние упругих колебаний (рис. б), приёмник окажется как бы в области «тени», отбрасываемой дефектом, и не будет регистрировать приход ультразвуковых волн. Отсутствие отклонения стрелки прибора свидетельствует о наличии дефекта. Этот метод называют методом «сквозного прозвучивания». С его помощью удаётся исследовать детали размером в несколько метров. Метод сквозного прозвучивания был разработан С. Я. Соколо-

вым. Им же был сконструирован нашедший себе широкое применение отражательный дефектоскоп. В этом приборе для обнаружения дефектов используется тот же приём, что и в ультразвуковом локаторе. В исследуемую

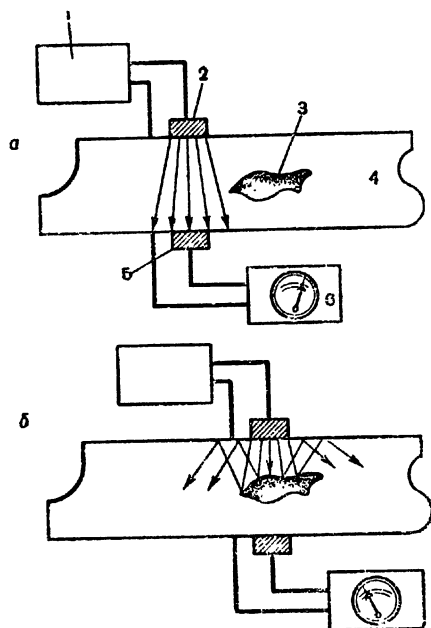


Рис. 8. Схема ультразвуковой дефектоскопии по методу «сквозного прозвучивания». 1 — генератор, 2 — излучатель, 3 — дефект, 4 — образец, 5 — приёмник, 6 — прибор-индикатор.

деталь посылается короткий ультразвуковой сигнал или, как говорят, импульс. Этот импульс бежит внутри детали и, отражаясь от её различных граней, возвращается в виде эхо-сигналов к излучателю. С помощью электронно-лучевой трубки эхо-сигналы делают видимыми. Когда на пути ультразвукового сигнала встречаются неоднородности, трещины или пустоты, рисунок эхо-сигнала меняется, и испытатель узнаёт таким образом о том, что деталь отличается от нормальной. На рисунке 9(а) изображён вид эхо-сигнала, полученный при исследовании одной из деталей, на котором зарегистрированы лишние

по сравнению с нормальной деталью изгибы луча, т. е. добавочные эхо-сигналы. После распиловки детали был действительно обнаружен изъян, изображённый на рисунке 9(б).

Ультразвуковое эхо возникает не только при наличии явных изъянов, но и в случае присутствия неоднородностей: областей, где металл более рыхлый, включений различных инородных тел и т. п. Ультразвуковой дефектоскоп позволяет исследовать степень однородности металла, приблизительно оценить средние размеры отдельных кристалликов. Чувствительность ультразвукового дефектоскопа настолько велика, что с его помощью можно определять глубину закалённого слоя в металлической детали, подвергнутой закалке. В этом случае, так же как при исследовании сварных швов, излучатель и приёмник ультразвука располагают на специальных призмах, благодаря чему ультразвуковые сигналы входят наклонно к поверхности исследуемого образца.

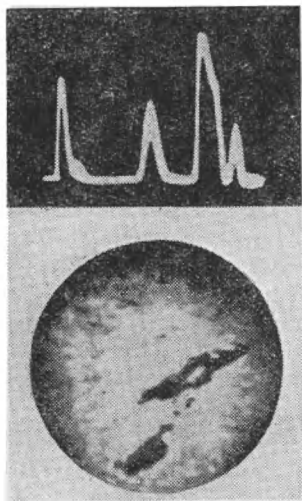


Рис. 9. Вид эхо-сигнала. Средний изгиб луча (а) соответствует отражению от дефекта, изображённого ниже (б).

Несколько лет назад С. Я. Соколов изобрёл замечательный прибор, названный ультразвуковым

микроскопом. Устройство ультразвукового микроскопа основывается на сходстве законов распространения световых и звуковых волн. С помощью специальных линз можно управлять ультразвуковым лучом так же, как мы управляем световым лучом. Специальное устройство даёт возможность получить невидимое ультразвуковое изображение какого-либо предмета, в котором светлым и тёмным местам оптического изображения будут соответствовать области, в которых вещество по-разному деформировано: в одних оно сжато, в других разрежено.

Схема действия ультразвукового микроскопа изображена на рисунке 10. Рассматриваемый предмет 2 поме-

щён в наполненную жидкостью ванну и «освещён» ультразвуковой волной, посылаемой излучателем 1. Линза 3 фокусирует «акустическое изображение» предмета на приёмной кварцевой пластинке 4. В результате деформации на приёмной пластинке возникают электрические заряды, интенсивность которых зависит от того, на-

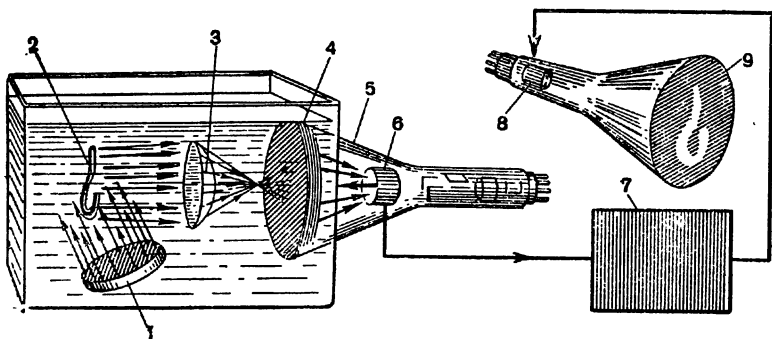


Рис. 10. Схема действия ультразвукового микроскопа.

сколько сильно деформирована пластинка. Приёмная пластинка служит дном катодной трубки 5. Узкий пучок катодных лучей падает на внутреннюю поверхность приёмной пластинки и выбивает из неё так называемые «вторичные» электроны. Выбитые электроны собираются на специальном электроде 6. Количество электронов, выбитых из какой-либо точки пластинки, зависит от её заряда в этой точке, т. е., другими словами, от деформации пластинки. Катодный луч, двигаясь по поверхности пластинки, попадает на участки, различающиеся зарядом, и, следовательно, выбивает разное количество вторичных электронов. Выбитые электроны создают переменный электрический ток, сила которого изменяется в зависимости от распределения деформации на приёмной пластинке или, в конечном счёте, в зависимости от характера «акустического изображения», сфокусированного на ней.

Электронный луч прочерчивает на пластинке ряд строк. Начав своё движение в точке А (рис. 11), он с постоянной скоростью движется вдоль строки, достигнув конца которой, практически мгновенно перескакивает в начальную точку строки, расположенной ниже, и дви-

жется вдоль неё с прежней скоростью. Таким образом, луч прочерчивает за 1 секунду 20—30 строк. Прочертив квадрат, луч перескакивает вновь в точку *A*, и движение его повторяется. Наблюдаемые при движении электронного луча в первой трубке изменения тока усиливаются 7 и подаются на сетку 8 второй электронной трубки 9, вызывая в ней соответствующие изменения интенсивности электронного луча. На экране трубки получают видимое изображение предмета, рассматриваемого в ультразвуковой микроскоп. Увеличение, достигаемое в ультразвуковом микроскопе, зависит от характеристик электронно-лучевых трубок 5 и 9. Согласно расчётам, оно может достигать порядка десятков тысяч раз.

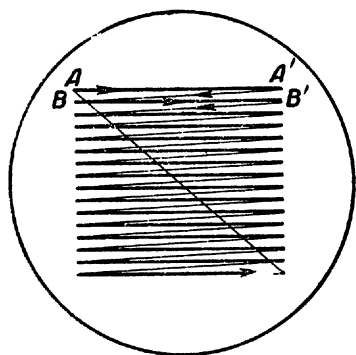


Рис. 11. Движение электронного луча в ультразвуковом микроскопе.

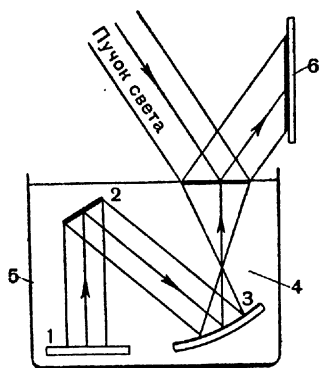


Рис. 12. Схема ультразвукового микроскопа новой конструкции.

Недавно С. Я. Соколов значительно упростил конструкцию ультразвукового микроскопа. Рассматриваемый предмет помещают в сосуд с жидкостью (рис. 12) и «освещают» однородным ультразвуковым лучом. Отразившиеся лучи с помощью зеркала фокусируются на поверхности жидкости. Падающие на поверхность со стороны жидкости ультразвуковые колебания вызывают появление на ней характерной «ряби». Однородный ультразвуковой луч с малой длиной волны создаёт очень равномерную рябь. Осветив поверхность жидкости косо падающим пучком света, можно отбросить на экран изо-

бражение поверхности жидкости, на котором будут чётко видны все неровности, создаваемые акустическим изображением рассматриваемого предмета. Можно также получить изображение предмета с помощью линзы.

В принципе разрешающая способность ультразвукового микроскопа приблизительно такая же, как и у оптического микроскопа. Следует иметь в виду, что на практике разрешающая способность ультразвукового микроскопа понижается в силу трудности получения однородного ультразвукового пучка.

С помощью ультразвукового микроскопа можно рассматривать предметы, заключённые в непрозрачную для света оболочку. Ультразвук очень чувствителен к изменению плотности среды; поэтому, например, при помощи ультразвукового микроскопа можно ясно различить потоки нагретой жидкости.

Широкие возможности открывает применение ультразвукового микроскопа в дефектоскопии. При помощи ультразвукового микроскопа можно получить изображение дефекта, расположенного на значительной глубине от поверхности металлической детали. Внешний вид ультразвукового микроскопа изображён на рисунке 13.

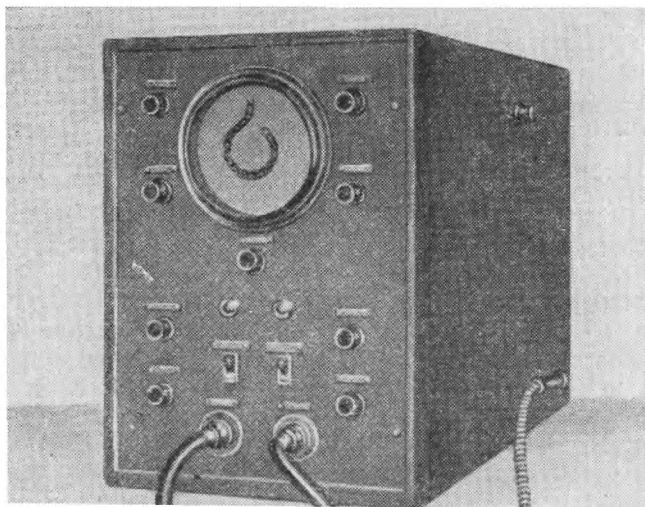


Рис. 13. Внешний вид ультразвукового микроскопа.

В кратком обзоре различных применений ультразвука мы не упомянули об использовании ультразвуковых методов в научно-исследовательских работах. Изучая распространение ультразвука в газах и жидкостях, можно сделать много ценных заключений об их свойствах и о тех процессах, которые в них протекают. Такие трудно изучаемые явления, как процессы обмена энергии при соударениях молекул газов, продолжительность жизни возбуждённой молекулы, вероятность возбуждения при молекулярных соударениях и т. д., удаётся исследовать с помощью ультразвуков.

В твёрдых телах ультразвуки позволяют исследовать механические свойства различных веществ, различные превращения, протекающие в твёрдых телах при изменении температуры, зависимость модулей упругости от частоты, с которой производится периодическая деформация образца и т. д.

Более подробно мы остановимся на этих вопросах в последней главе.

Советские учёные идут в первых рядах исследователей ультразвука. С каждым годом расширяется область практического применения ультразвуков, растёт интерес к ним у работников самых различных областей науки и техники. Высокочастотные упругие колебания помогают нам исследовать вещество, влиять на процессы, протекающие в нём, изменять его свойства. Всё это делает желательным знакомство школьников с основными свойствами и особенностями ультразвуков.

ГЛАВА 2

МЕТОДЫ ПОЛУЧЕНИЯ УЛЬТРАЗВУКА

Применяемые в настоящее время генераторы ультразвука можно разделить на три группы: механические, пьезоэлектрические и магнитострикционные.

В последние годы с помощью механических генераторов удалось получить чрезвычайно интенсивные ультразвуки. Для этой цели применяют ультразвуковые сирены (рис. 14), состоящие из неподвижного диска с отверстиями — статора и подвижного диска с зубцами — ротора. При вращении, отверстия в статоре попеременно то закрываются зубцами, то оказываются в промежутках

между ними. Если подвести к сирене сжатый воздух, то из неё вырвется пульсирующая воздушная струя. Допустим, что число зубцов ротора сирены и соответственно число отверстий статора равно 110; тогда, если ротор совершает 15 000 оборотов в минуту, сирена будет излу-

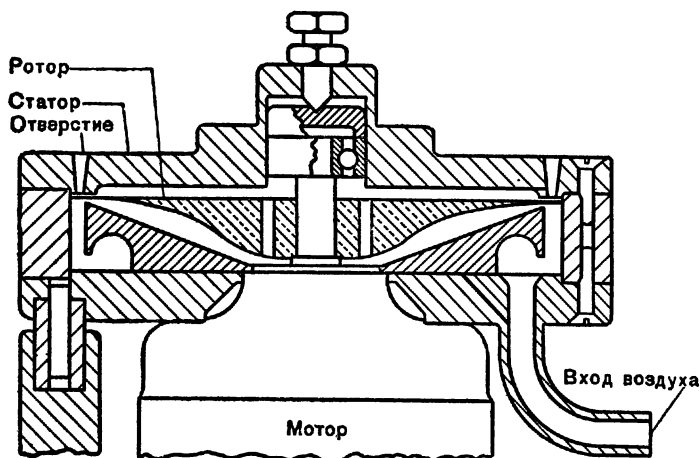


Рис. 14. Схема мощной ультразвуковой сирены.

чать ультразвуковую волну с частотой 27,5 кГц. Таким способом можно получить ультразвуки и большей частоты.

Проиллюстрировать мощность ультразвуковой волны, получаемой с помощью такой сирены, можно следующим примером: если расположить кусок ваты на пути ультразвукового луча недалеко от сирены, он через несколько секунд вспыхнет в результате поглощения ультразвуковой энергии. К сожалению, постройка подобной сирены сложна.

Из механических генераторов в небольшой лаборатории можно осуществить, пожалуй, только свисток Гальтона или какую-либо его модификацию. Этот несложный прибор изображен на рисунке 15. Он состоит из очень короткой трубки — резонатора *А* с острыми краями, на которые направляется воздушная струя, выходящая из кольцеобразного сопла *В*. Попадая на острые края резонатора, воздушная струя вызывает возникновение звуко-

вых колебаний различной частоты. Те колебания, частота которых совпадает с частотой собственных колебаний резонатора, усиливаются так, что можно получить целый

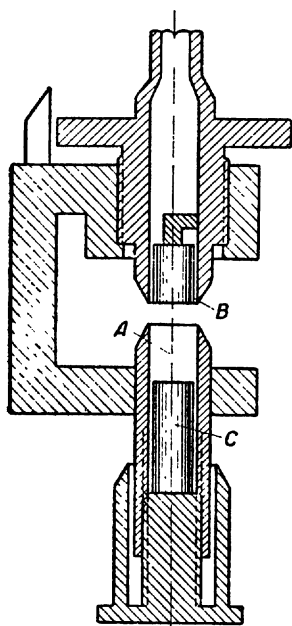


Рис. 15. Свисток Гальтона.

ряд чистых тонов. Чтобы изменять высоту тона, перемещают поршень С, служащий дном резонатора. Это перемещение осуществляется обычно при помощи микрометрического винта. Пользуясь свистком Гальтона, можно получить упругие волны с частотами от $3,5 \cdot 10^3$ гц до 10^5 гц. Однако обычный свисток Гальтона¹ даёт возможность получать лишь малоинтенсивные ультразвуки.

Чаще всего для получения ультразвуковых волн в лабораторной практике используются пьезоэлектрические генераторы.

Кристаллы некоторых веществ обладают замечательным свойством: если вырезать определённым образом из такого кристалла пластинку и сжать её, то на её противоположных гранях появятся разноимённые электрические заряды. При замене сжатия растяжением знаки зарядов меняются: грань, которая при сжатии пластинки была заряжена положительно, теперь будет заряжена отрицательно и наоборот. Возникновение электрических зарядов на гранях пластинки при её деформациях называют пьезоэлектрическим эффектом. Этим свойством обладают кристаллы кварца (SiO_2), сегнетовой соли $\text{NaKC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, турмалина, дегидрофосфата аммония ($\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$) и некоторых других веществ. Пьезоэлектрический эффект обратим. Это означает, что если к противоположным граням пластинки, вырезанной из пьезоэлектрического кристалла, подвести разноимённые электрические заряды, форма пластинки изменится. При одном

¹ В последние годы сконструированы свистки Гальтона, дающие возможность получать весьма мощные ультразвуковые колебания.

расположении зарядов пластинка станет толще, при другом — тоньше. Подобные изменения формы пластинки могут происходить практически с любой частотой. Обратный пьезоэлектрический эффект используется для получения ультразвуковых волн в пьезоэлектрических генераторах.

Достаточно покрыть противоположные грани пьезоэлектрической пластинки тонким слоем металла и подвести к ним переменное электрическое напряжение, чтобы заставить пластинку изменять свою форму в такт с изменениями электрического напряжения. Грани пластинки будут при этом совершать движения, напоминающие движения поршня в цилиндре двигателя, пластинка будет как бы «дышать» и создавать в окружающем веществе чередующиеся сжатия и разрежения, т. е. упругую продольную волну соответствующей частоты. Обычно для этой цели используются пластинки, вырезанные из кристалла кварца. На рисунке 16 изображён кристалл

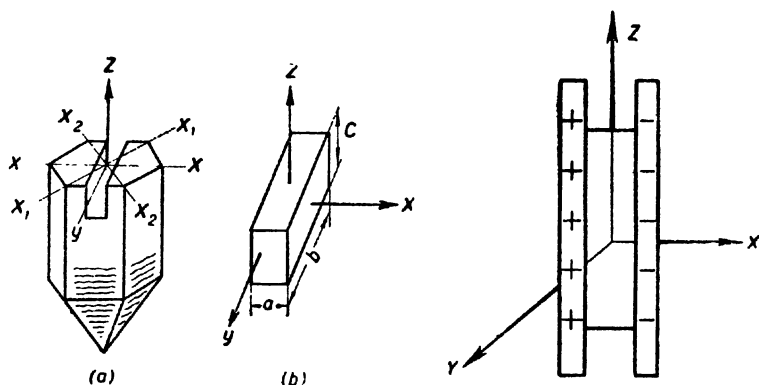


Рис. 16. Кристалл кварца и вырезанная из него пластинка X-среза. Рис. 17. Пьезоэлектрическая пластинка в конденсаторе.

кварца и показано, как вырезается пластинка наиболее часто применяемого в ультразвуке так называемого X-среза. Если подвергнуть пластинку действию силы, направленной вдоль оси X , то на грани bc и ей противоположной возникнут разноимённые электрические заряды. При расположении пластинки между обкладками конденсатора, как это изображено на рисунке 17, она расширится в направлении оси X и сожмётся в направле-

нии оси Y . Относительное удлинение пластинки невелико и определяется соотношением:

$$X_x = d_{11} E_1, \quad (1)$$

где E_1 — напряжённость электрического поля, равная градиенту потенциала¹, и d_{11} — коэффициент, равный для кварца $6,8 \cdot 10^{-8}$. Следует подчеркнуть, что при данной разности потенциалов полное удлинение не зависит от размеров пластинки. Приняв $a = b = c = 1$ см и разность потенциалов $V_1 = 1000$ в, найдём напряжённость поля

$$E_1 = \frac{V_1}{d_1} = 1000 \text{ в/см} = \frac{1000}{300} \text{ CGSE}$$

и удлинение вдоль оси X

$$X_x = d_{11} \cdot E_1 = 6,8 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{1000}{300} = 22,6 \cdot 10^{-8} \text{ см.}$$

Исключительно малое удлинение пластинки следует иметь в виду, когда обсуждаются возможные использования ультразвука или демонстрации его свойств. Для того чтобы увеличить размах колебаний кварцевой пластинки, её заставляют колебаться с частотой, совпадающей с частотой её собственных или свободных колебаний. Амплитуда колебаний пластинки в этом случае может быть подсчитана по уравнению

$$X_r = X_s \frac{m}{\pi}, \quad (2)$$

где X_s — смещение под действием постоянного электрического поля той же напряжённости и m — отношение акустических сопротивлений кварца и среды, в которую он помещён. Для того чтобы избежать электрического пробоя по краю кварцевой пластинки и одновременно увеличить количество отдаваемой ею акустической энергии, пластинку помещают в жидкость с высокими изоляционными свойствами, например трансформаторное или вазелиновое масло. Акустическое сопротивление кварца,

¹ Градиентом потенциала называют падение потенциала, приходящееся на единицу длины $\frac{\Delta V}{\Delta l}$; градиент потенциала измеряют в вольтах на сантиметр.

измеряемое произведением скорости звука в нём на его плотность, равно $1,65 \cdot 10^6$, а акустическое сопротивление трансформаторного масла соответственно $1,4 \cdot 10^5$ CGS. Поэтому для кварцевой пластинки, помещённой в трансформаторное масло, значение m в уравнении (2) будет приблизительно равно 10 и резонансная амплитуда колебаний будет в три с небольшим раза превышать статическое смещение X_s .

Собственная частота колебаний кварцевой пластинки X-среза определяется её толщиной и может быть подсчитана по формуле

$$f = \frac{2,87 \cdot 10^6}{d} \text{ гц}, \quad (3)$$

где d — толщина пластинки в миллиметрах.

Ниже приведены толщины пластинок X-среза, обладающих различной собственной частотой:

| | | | | | | | | | |
|----------------|-------|------|------|------|------|------|------|------|-------|
| Частота (мггц) | 0,1 | 0,3 | 0,6 | 1,0 | 2,0 | 3,0 | 4,0 | 5,0 | 6,0; |
| Толщина (мм) | 28,70 | 9,56 | 4,78 | 2,88 | 1,44 | 0,95 | 0,72 | 0,57 | 0,44. |

Кварцевые пластинки производятся в настоящее время различных размеров, толщиной от 1,3 см до 0,05 мм.

Можно рекомендовать приобрести для опытов две пластинки, одну из них толщиной около 2,0 мм и другую 0,5 мм. Проще заказать круглые пластинки диаметром около 20 мм.

Собственные частоты колебаний этих пластин будут соответственно равны $1,44 \cdot 10^6$ и $5,74 \cdot 10^6$ гц. Если желательно варьировать частоту ультразвуковой волны, то можно возбуждать пластинки на гармониках. Поскольку возбуждаются нечётные гармоники, то таким образом с помощью первой пластинки можно будет получить ультразвуковые волны с частотами: 1,44; 4,32; 7,20; 10,08; 12,96 мггц, а с помощью второй пластинки волны с частотами: 5,74; 17,22; 28,70 мггц и т. д.

Интенсивность акустической энергии, излучаемой пластинкой, зависит от подводимого к ней напряжения. На рисунке 18 приведена номограмма, позволяющая определить величину напряжения, необходимого для получения ультразвуковой волны желаемой интенсивности. Номограмма относится к тому случаю, когда одна грань пластинки погружена в жидкость, а другая граничит с воздухом. Как легко убедиться, для получения ультразвуков

большой интенсивности требуется весьма высокое напряжение. Ориентировочно можно подсчитать излучаемую мощность по формуле:

$$W_{(см)} = \frac{V \cdot f^2 \cdot S_1}{1,05 \cdot 10^6}, \quad (4)$$

где f — частота в мГц, S_1 — излучающая поверхность в см², V — подаваемое на пластинку напряжение.

Повышать напряжение надо с осторожностью, поскольку в случае возникновения искрового разряда по краю

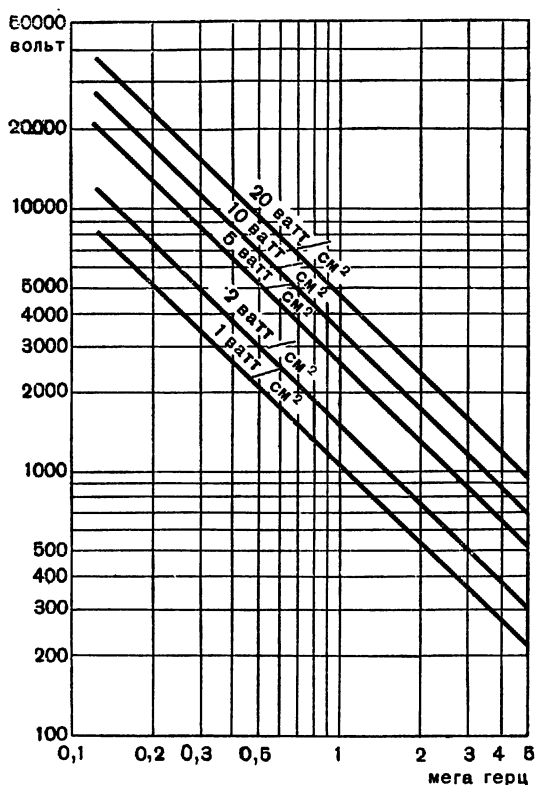


Рис. 18. Номограмма для определения электрического напряжения, необходимого для получения определённой акустической интенсивности.

пластинки последняя может разрушиться. Безопасное для целостности пластинки напряжение составляет для пластинок толщиной до 8 мм около $1,5 \cdot 10^3$ в на каждый миллиметр толщины. При повышении напряжения для уменьшения вероятности возникновения электрического пробоя следует особенное внимание уделить чистоте масла, в которое погружена пластинка.

Для того чтобы подвести к граням кварцевой пластинки переменное электрическое напряжение, они обычно покрываются тонким слоем металла, чаще всего серебрятся. Существует несколько рецептов химического серебрения, из которых мы опишем простой способ, дающий вполне надёжные результаты.

Предназначенную для серебрения пластинку необходимо первоначально тщательно вымыть горячей водой с мылом и щёткой, а затем, сполоснув её дистиллированной водой, положить в ванночку с хромовой смесью (20 г $K_2Cr_2O_7$ на 1 л H_2SO_4 уд. веса 1,84), в которой и оставить на несколько часов. Вынув пластинку из хромовой смеси, её тщательно споласкивают дистиллированной водой и помещают в химический стакан с дистиллированной водой, в которой и сохраняют её до момента серебрения. При приготовлении растворов для серебрения необходимо пользоваться только дистиллированной водой¹.

Для серебрения приготавливают два раствора. Первый: в колбу ёмкостью 500 мл наливают приблизительно 200 мл дистиллированной воды и растворяют в ней 5 г азотнокислого серебра ($AgNO_3$). Примерно одну треть раствора отливают в маленькую колбу в качестве резерва, а к оставшемуся раствору азотнокислого серебра добавляют небольшими порциями раствор аммиака в воде. При этом первоначально выпадает осадок шоколадного цвета, который при дальнейшем добавлении аммиака вновь растворяется. Аммиак следует приливать только до тех пор, пока растворится весь осадок. Прибавляя аммиак, колбу следует энергично встряхивать. После растворения всего осадка в колбу добавляют часть первоначально отлитого раствора азотнокислого серебра, причём снова выпадает осадок, который растворяют, добавляя по кап-

¹ Водопроводная вода, как правило, содержит примесь солей, делающих её непригодной для этой цели.

лям раствор аммиака. Таким образом поступают до тех пор, пока не израсходуется весь раствор азотнокислого серебра. Полученный в результате раствор должен слабо опалесцировать. Если случайно прилили слишком много аммиака, то можно растворить ещё некоторое количество азотнокислого серебра и добавить его к приготавливаемому раствору. Готовый раствор фильтруют через вату и добавляют воды с таким расчётом, чтобы общий объём составлял 500 мл, закрывают пробкой и сохраняют до серебрения в тёмном месте.

Для приготовления второго раствора отвешивают $1 \pm 0,2$ г азотнокислого серебра и $0,83 \pm 0,01$ г сегнетовой соли¹. Каждое из этих веществ растворяют в отдельной пробирке по возможности в небольшом количестве дистиллированной воды. Затем в полулитровую колбу наливают 500 мл дистиллированной воды, доводят её до кипения и приливают медленно приготовленный в пробирке раствор азотнокислого серебра. Когда кипение в колбе возобновится, приливают раствор сегнетовой соли. Жидкость первоначально окрашивается в коричневый цвет, который затем переходит в серый. Приблизительно через 2 минуты реакция заканчивается, серый осадок отфильтровывают и приготовленный раствор сохраняют в закрытой колбе.

Для серебрения осторожно вынимают кварцевую пластинку из воды, беря её чистыми пальцами только за края (прикасаться пальцами к поверхности, предназначенной для серебрения, ни в коем случае нельзя!), и, не вытирая, помещают на дно чисто вымытого и сполоснутого дистиллированной водой химического стакана, приливают отмеренное количество первого раствора и добавляют такое же количество второго раствора. Подогревание при этом необязательно, процесс хорошо идёт при комнатной температуре. Первоначально появляется синеватый налёт серебра, который спустя некоторое время переходит в блестящий металлический слой, жидкость делается мутной, и на её поверхности появляются серебряные блёстки. По окончании процесса жидкость сливают, пластинку ополаскивают дистиллированной водой, не прикасаясь руками к посеребрённой поверхности, и остав-

¹ Сегнетову соль ($\text{NaKC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) можно приобрести в магазинах химических реактивов.

ляют в покое на два-три дня для того, чтобы слой высох и уплотнился. Если при окончании серебрения окажется, что металлический слой слишком тонок, весь процесс можно повторить. Если желательно посеребрить обе поверхности, то пластинку вынимают, ополаскивают дистиллированной водой, переворачивают и процесс серебрения повторяют.

Высушенную пластинку вытирают замшей или мягкой тряпочкой и снимают слой серебра, образовавшийся на боковых гранях пластинки. Для этого в небольшой стаканчик наливают немного крепкой азотной кислоты и, остро срезав конец спички, опускают его в кислоту, а затем проводят по боковой грани так, чтобы острие среза совпадало с направлением грани, удаляя таким образом слой серебра. Надо следить за тем, чтобы кислота не попала на излучающую поверхность кварцевой пластинки. Можно рекомендовать иметь под рукой кусочек фильтровальной бумаги, которым и удалять с грани избыток жидкости. Освободив боковые грани от металлического слоя, надо хорошо вымыть пластинку водопроводной водой и насухо вытереть. Теперь пластинка готова для употребления. Вместо серебрения можно приклеить к противоположным граням пластинки с помощью спиртового раствора шеллака¹ тонкую фольгу.

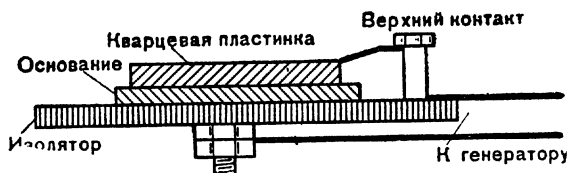


Рис. 19. Схема простейшего кварцедержателя.

Приготовленная, как описано выше, пьезоэлектрическая пластинка располагается на специальном кварцедержателе. Простейший кварцедержатель изображён на рисунке 19. К дощечке из изолирующего материала — эбонита, текстолита, плексигласса и т. п. — прикрепляется полированная медная или латунная пластинка, слу-

¹ Шеллаком называют смолу, спиртовой раствор которой применяют для лакировки и полировки дерева, как изоляционный материал и т. п. Шеллак можно приобрести в магазинах химических реактивов.

жащая основанием, на котором располагается колеблющаяся кварцевая пластинка. Верхний контакт делается пружинящим. Материалом для его изготовления может служить тонкая и упругая металлическая фольга. В том случае, когда кварц колеблется в масле, устройство контактов обычно хлопот не доставляет; наоборот, в случае колебаний, происходящих в воздухе, устройство верхнего контакта может доставить много хлопот.

Мы получали хорошие результаты с контактами, сделанными из тонкого слюдяного лепестка, обёрнутого в

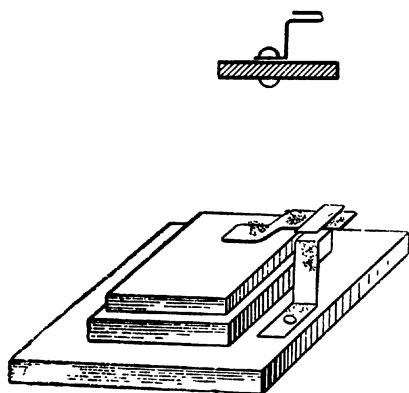


Рис. 20. Устройство пружинящего контакта.

оловянную фольгу и зажатого в латунный держатель, как это показано на рисунке 20. При таком устройстве контакта нам удавалось получать устойчивую генерацию ультразвуковой волны в воздухе в то время, как при другом устройстве генерация была или неустойчивой или очень слабой. Большое значение имеет сила, с которой верхний контакт прижимается к пластинке. Насколько плотно следует прижимать контакт к кристаллу, находят опытным путём.

Можно изготавливать верхний контакт в виде кисточки из очень тонких проволочек, однако при этом металлический слой на пластинке со временем разрушается в результате действия микроскопических искорок, проскакивающих между проволочками и поверхностью пластинки. Контакт не следует располагать особенно близко к боковой грани пластинки для уменьшения вероятности электрического пробоя по её краю.

Удобный универсальный держатель для кварца изображён на рисунке 21. Кварцевая пластинка K при помощи пружины F_1 прижимается к металлической пластинке A , имеющей отверстие для выхода ультразвуковых колебаний. Сила, с которой прижимается кварцевая пластинка, регулируется вращением винта E_2 . Перемен-

ное электрическое напряжение подводится к пластинке A и винту E_2 . Весь держатель вместе с кварцевой пластинкой прикрепляется с помощью винта E_1 к эбонитовому стержню D . Такое крепление позволяет изменять угол, образованный излучающей поверхностью кварцевой пла-

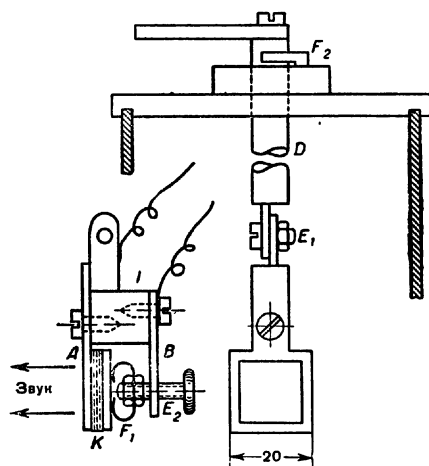


Рис. 21. Схема универсального кварцедержателя.

стинки с вертикальной осью. Стержень D может перемещаться вверх и вниз и закрепляется в нужном положении стопорным винтом F_2 . Вращая стержень вокруг его оси, можно изменять направление ультразвуковой волны в горизонтальной плоскости.

Интенсивность ультразвукового излучения, создаваемого кварцевой пластинкой при данном переменном напряжении, можно увеличить, расположив пластинку не на сплошном металлическом основании, а на натянутой тонкой фольге металлического барабанчика. В этом случае ультразвуковые волны почти полностью отражаются от границы с воздухом и интенсивность излучения приблизительно удваивается. Для устройства барабанчика пригодна любая металлическая коробочка, отверстие которой надо натянуть фольгой. Крепление фольги зависит от материала, из которого она сделана и её толщины. Медную или латунную фольгу можно припаять к краю ба-

рабанчика, алюминиевую фольгу или тонкие слюдяные листочки следует приклеить.

Для этой цели изготовляют картонный манжет несколько большего диаметра по сравнению с диаметром барабанчика, надевают его на край последнего так, чтобы края манжета слегка выступали (рис. 22), и наполняют образовавшийся канал каким-либо клеем, например клеем БФ, жидким стеклом, смешанным с мелом, или коллодием, перемешанным с тонко измельчённым асбестом¹. Затем накладывают мембрану и сверху по краям снова клей с таким расчётом, чтобы он тонким ободком охватил мембрану. Подобное крепление не очень стойко и со временем разрушается. Однако изготовление его столь несложно, что это окупает необходимость время от времени изготавливать барабанчик вновь. В дне его следует просверлить отверстие, через которое можно будет выливать протекающее во внутреннюю полость через различные неплотности масло.

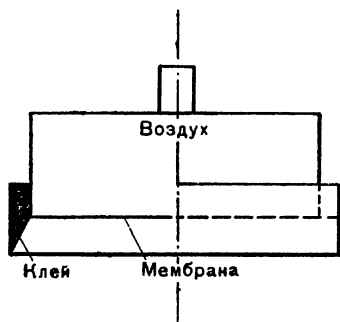


Рис. 22.

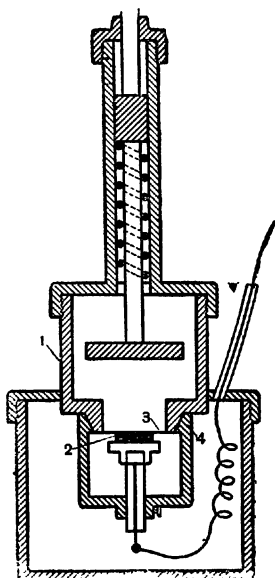


Рис. 23. Ультразвуковой интерферометр для жидкостей.

В описанных способах крепления кварцевая пластинка помещалась или в масло, или непосредственно в исследуемую жидкость. Иногда бывает необходимо отде-

¹ Указанные клеящие вещества можно приобрести в магазинах химических реактивов, москательных магазинах или аптеках.

лить жидкость, в которой исследуется распространение звука от колеблющейся пластинки. Для этой цели употребляются разного рода мембраны. Удобный сосуд для подобных исследований изображён на рисунке 23. Рабочая камера 1 отделена от кварца 2 тонкой металлической мембраной 3, края которой защемлены конической шайбой 4. Для простых опытов можно кварцевую пластинку отделить от рабочей камеры тонкой плёнкой животного происхождения (бычий пузырь) или целофана. В этом случае измерительную камеру можно изготовить из широкой стеклянной трубки, один из концов которой затянуть перепонкой. Контакт с верхней поверхностью пластинки осуществляется с помощью тонкого лепестка фольги. Пластика помещается в масло и прижимается к перепонке пружинкой, которая является одновременно контактом с тыльной поверхностью кварца.

В литературе описаны и такие случаи, когда жидкость, в которой изучается распространение ультразвука, наливается в стеклянную кювету, а колеблющаяся кварцевая пластинка прижимается снаружи ко дну или стенке кюветы.

Для того чтобы покончить с вопросом об устройстве излучателя ультразвука, укажем, какие требования предъявляются к жидкости, в которую погружена колеблющаяся пластинка. В случае генераторов большой мощности и, следовательно, высоких напряжений на обкладках кварцевой пластинки качество масла имеет исключительно большое значение. Как показал опыт, именно качество масла ставит предел увеличению интенсивности ультразвуковых волн, получаемых при помощи пьезокварцевых генераторов. При получении мощных ультразвуковых волн масло следует подвергать тщательной очистке, предохранять его от попадания пыли и влаги. В случае электрического пробоя необходимо целиком сменить масло и тщательно вычистить кварцевую пластинку и контакты. При высоких напряжениях на обкладках пластинки следует пользоваться только высококачественным трансформаторным или вазелиновым маслом. Если напряжение не слишком велико (250—500 в), то кварцевую пластинку можно спокойно помещать в обычный керосин, профильтровав его через бумажный фильтр для удаления механических загрязнений. Следует помнить, что

керосин — горючая жидкость, и соблюдать при работе с ним необходимую осторожность.

После того, как устройство пьезоэлектрического излучателя окончено, остаётся изготовить ламповый генератор. Схемы генераторов весьма разнообразны. Мы опишем простейший генератор, вполне надёжный в работе. На рисунке 24 изображена схема генератора. На прак-

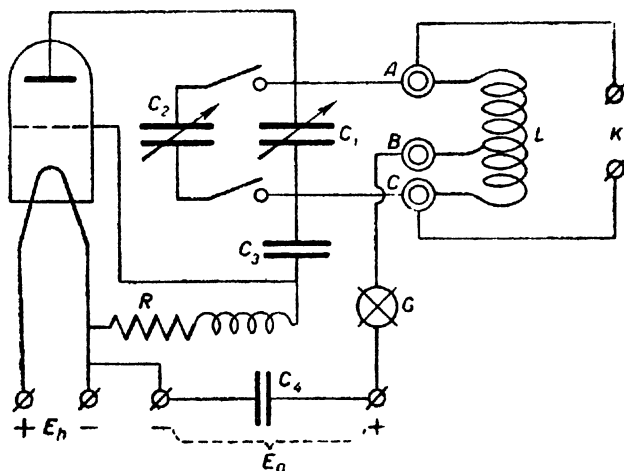


Рис. 24. Схема пьезокварцевого генератора. $C = 100$ пкф (максимально), $C_2 = 2500$ пкф, $C_3 = 1000$ пкф, $C_1 = 1-2$ мкф.

тике можно избежать применения конденсатора C_2 , заменив конденсатор C_1 обычным радиолюбительским конденсатором, максимальной ёмкостью приблизительно 500 pF . Сведения, необходимые для устройства генераторов, рассчитанных на разные интервалы частот, приведены в таблице 1.

Если в качестве генераторной лампы воспользоваться подогревным триодом 6С5, то сопротивление R надо взять порядка 50—60 $k\Omega$.

Сила анодного тока при этом будет приблизительно 8 mA . Для получения более мощных колебаний можно заменить лампу 6С5 лучевым тетродом 6ПЗ. В этом случае R следует уменьшить до 20—30 $k\Omega$, но так как сила тока будет значительна, надо применять проволочное сопротивление. Экранную сетку можно соединить с анодом

Т а б л и ц а I

| Диапазон мггц | Число витков | | Диаметр катушки мм | Шаг намотки мм | Способ изготовления |
|-----------------------------|--------------|-------------------------------|-----------------------|-------------------|--|
| | в катушке | между сеткой и анодом батареи | | | |
| 26,3—13,6 | 2 | 1 $\frac{1}{3}$ | 100 | 8 | 3-мм медная проволока без каркаса |
| 18,7—9,8 | 4 | 1 $\frac{1}{2}$ | 80 | 4 | 3-мм медная проволока без каркаса |
| 10—5 | 9 | 3 | 80 | 4 | 3-мм медная проволока без каркаса |
| 5,46—2,73 | 14 | 5 | 100 | 2 | Однослойная из изолированной проволоки на катушке из пертиакса |
| 3—1,76 } 1,2—0,4* } | 24 | 9 | 100 | 2 | Однослойная из изолированной проволоки на катушке из пертиакса |
| 2,14—1,50 } 0,54—0,13* } | 41 | 14 | 100 | 1,7 | Однослойная из изолированной проволоки на катушке из пертиакса |
| 0,27—0,075 | 90 | 30 | 150 | 1,2 | Трёхслойная безъёмкостная на каркасе из пертиакса |

лампы через сопротивление порядка 40—50 кΩ. На рисунке 25 изображён монтаж генератора, собранного по указанной схеме на лампе 6ПЗ. Катушка самоиндукции имела диаметр 55 мм и была намотана медной проволокой диаметром 2 мм. Длина намотки составляла 80 мм, общее число витков было равно 27, а часть катушки, включённая между точками В и С, имела 11 витков. Генератор устойчиво работал в интервале частот от 2,0 до 6,25 мггц. Для питания маломощного генератора можно пользоваться сухими батареями типа БАС-80, которые нельзя рекомендовать для более мощных генераторов. В последнем случае прибегают к выпрямителю. На рисунке 26 изображена схема устройства двухполупериодного выпрямителя вместе с необходимыми данными. Если не окажется трансформатора, необходимого для устройства выпрямителя, можно воспользоваться переменным током 120 в и бестрансформаторным двухполупериодным вы-

¹ Более низкая частота, отмеченная звёздочкой, достигается при включённом конденсаторе С₂.

прямителем с удвоением напряжения, схема которого изображена на рисунке 27. C_1 , C_2 и C_3 — электролитические конденсаторы ёмкостью 20—30 F и рабочим напряжением 350 v , $R\phi$ — фильтровое сопротивление 1000 10 $вт$.

В последнее время широкое применение находят себе твёрдые выпрямители — купроксные и селеновые. Кон-

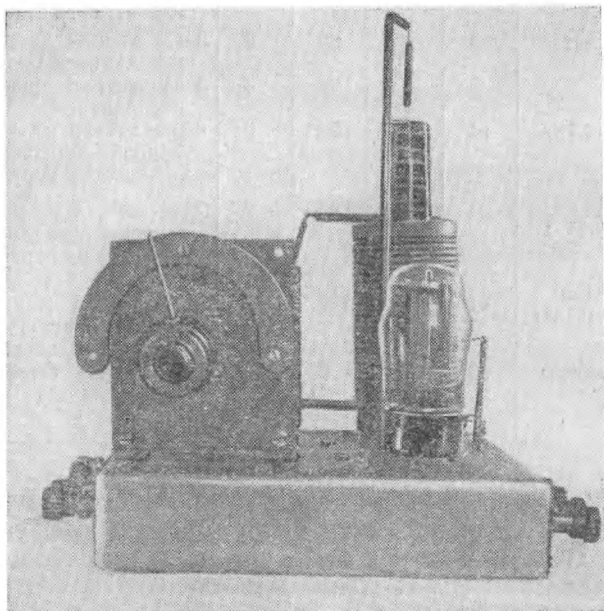


Рис. 25. Монтаж генератора.

структивно они выполняются в виде шайб круглой или прямоугольной формы, набираемых в столбики. Число шайб зависит от выпрямляемого напряжения. Каждая шайба является выпрямительным элементом: её сопротивление электрическому току в одном направлении в сотни и тысячи раз больше, чем в противоположном. Предельное напряжение, допустимое для отдельной шайбы, составляет для селеновых выпрямителей 15—20 v , поэтому при работе от сети переменного тока 120 v требуется столбик не меньше, чем из 6—8 селеновых шайб, соединённых последовательно. Величина выпрямленного

тока зависит от поверхности шайбы; так, например, селеновые шайбы диаметром 20—30 мм могут пропускать ток около 0,1 А. Схема двухполупериодного селенового

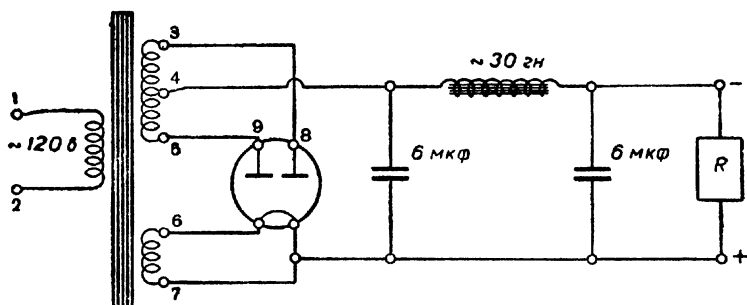


Рис. 26. Принципиальная схема выпрямителя с двуханодным кенотроном. 1, 2 — входные клеммы переменного тока; 3, 4, 5 — выводы повышающей обмотки трансформатора; 6, 7 — выводы обмотки, питающей накал лампы; 8, 9 — аноды кенотрона.

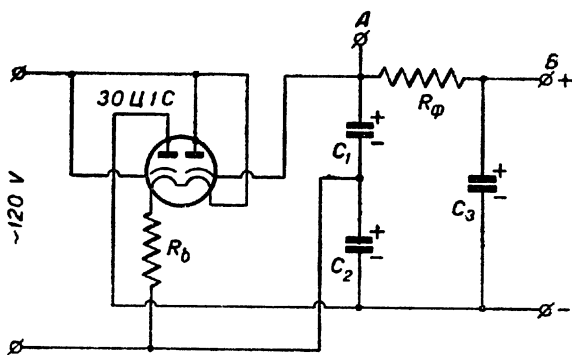


Рис. 27. Схема бестрансформаторного двухполупериодного выпрямителя с удвоением напряжения.

выпрямителя с удвоением напряжения изображена на рисунке 28. Сопротивления R_1 и R_2 берутся порядка 10 Ω , а ёмкости зарядных конденсаторов C_1 и C_2 возможно большими (16 μF и выше). Поскольку напряжение в сети обычно колеблется, иногда применяют спе-

циальные стабилизаторы напряжения, описание которых можно найти в литературе¹.

Когда монтаж генератора окончен, к нему подключают источник питания и убеждаются в исправности ра-

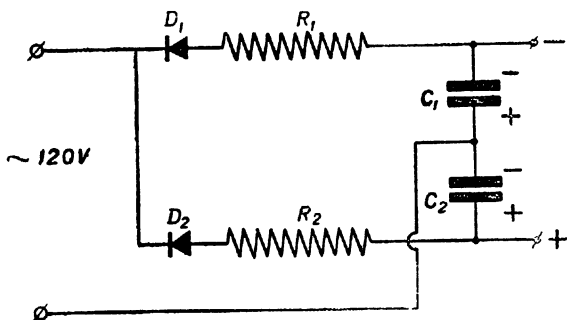


Рис. 28. Схема двухполупериодного выпрямителя с удвоением напряжения, в котором использованы твёрдые выпрямители.

боты. Для обнаружения генерации удобно устроить маленький пробный контур, наподобие изображённого на рисунке 29. Желательно применить по возможности

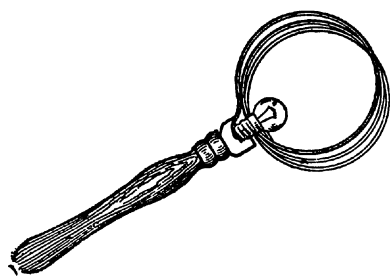


Рис. 29

низковольтную лампочку, например одновольтную. Поднося пробный контур к катушке самоиндукции генератора, можно по загоранию лампочки убедиться в том, что прибор генерирует. Если лампочка не загорается, следует медленно вращать ручку переменного конденсатора до тех пор, пока лампочка не загорится. Если этого не

удастся добиться, следовательно, в приборе имеется какой-то дефект, который необходимо обнаружить и устранить. Для обнаружения генерации можно воспользоваться также маленькой неоновой лампочкой, которая должна вспыхивать при поднесении к работающему гене-

¹ См., например, «Методы экспериментальной электроники», Изд. иностр. лит-ры, 1949, или А. М. Бонч-Бруевич, Применение электронных ламп в экспериментальной физике, ГТТИ, 1950.

ратору. Ещё лучше, держа лампочку за металлический цоколь, провести стеклянным колпачком её по виткам катушки самоиндукции работающего генератора (конечно, необходимо следить за тем, чтобы не прикоснуться пальцами руки к виткам). При генерации лампочка загорается. Наконец, возникновение генерации можно установить на основании показаний прибора постоянного тока, включённого в контур. Если вращать ручку конденсатора переменной ёмкости, то сила тока, текущего через прибор, изменяется; возникновению генерации соответствует резкое уменьшение силы анодного тока.

Добиваться минимального значения силы анодного тока не следует, так как в этом случае генерация делается неустойчивой. Можно рекомендовать вмонтировать постоянно на панель генератора какой-либо индикатор силы постоянного тока и сделать на его шкале отметку соответствующую положению стрелки при нормальной генерации.

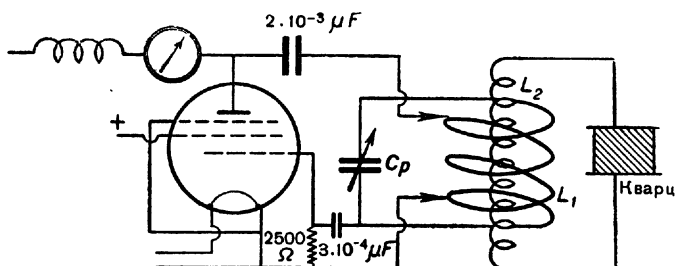


Рис. 30. Схема генератора для получения мощных ультразвуковых колебаний с индуктивной связью пьезоэлектрической пластинки с колебательным контуром.

Убедившись тем или иным способом в наличии генерации, присоединяют к генератору контакты от кварцедержателя. Соединительные провода не следует скручивать. Кварцевая пластинка присоединяется или непосредственно к концам катушки самоиндукции колебательного контура или же связывается с ним индуктивной связью (рис. 30). Для осуществления последней в катушку самоиндукции колебательного контура вставляется вторая катушка, к концам которой и присоединяется колеблющаяся пластинка. На рисунке 25 видна катушка связи, проходящая внутри основной катушки самоиндукции.

Индуктивную связь можно использовать для того, чтобы получить весьма интенсивные ультразвуковые волны. Кварц вместе с катушкой связи представляет отдельный колебательный контур. Подбирая число витков катушки связи, можно добиться резонанса между основным колебательным контуром и контуром кварца; при этом напряжение на обкладках пластинки сильно возрастёт, одновременно возрастёт и интенсивность совершаемых ею колебаний. Пользоваться этим приёмом надо с осторожностью, так как легко могут возникнуть напряжения, опасные в отношении электрического пробоя, а следовательно, в отношении механической целостности пластинки.

Теперь остаётся только убедиться в том, что кварцевая пластинка действительно колеблется. При слабых колебаниях это сделать не всегда просто. Можно рекомендовать следующий приём: ванночку с колеблющейся пластинкой располагают таким образом, чтобы на поверхности жидкости над пластинкой можно было наблюдать смотря на неё под острым углом, изображение какого-либо предмета с резко очерченными границами, например, отражённое изображение переплётов оконной рамы или волосков зажжённой электрической лампочки и т. п. Включив генератор, медленно вращают ручку конденсатора переменной ёмкости, следя одновременно за изображением на поверхности жидкости. В момент возникновения даже слабых колебаний пластинки правильные линии изображения слегка размоются, сделаются извилистыми. Поверхность жидкости при возникновении ультразвуковой волны будет как бы вздрагивать. Вращая ручку конденсатора дальше, можно вывести генератор из резонанса с пластинкой, её колебания прекратятся и изображение на поверхности жидкости вновь сделается неискажённым. Для того чтобы убедиться в том, что искажение изображения не вызвано случайными сотрясениями, всегда неизбежными в работе, описанную операцию повторяют несколько раз. При мощных ультразвуковых колебаниях на поверхности жидкости возникает легко заметная характерная рябь. Очень интенсивные колебания вызывают появление на поверхности жидкости масляного фонтана.

Помимо кварцевых пластин, для получения ультразвуков можно воспользоваться пластинками из кристал-

лов сегнетовой соли или дигидрофосфата аммония. Пьезоэлектрические свойства кристаллов сегнетовой соли более сложны, чем у кристаллов кварца. Пластины из сегнетовой соли чаще применяются в области звуковых частот. Иногда их применяют и в области ультразвуковых частот до нескольких сотен килогерц. На их свойствах и применении мы останавливаться не будем¹.

Для получения ультразвуков, наряду с пьезоэлектрическими генераторами, широко применяются магнито-стрикционные. При намагничивании или размагничивании ферромагнитных тел их размеры изменяются — это явление называют магнито-стрикционным эффектом. Если стержень из ферромагнитного материала поместить в катушку изолированной проволоки, по которой протекает переменный электрический ток, то длина стержня будет изменяться: стержень будет то удлиняться, то укорачиваться. Относительное изменение длины стержня невелико и составляет приблизительно 10^{-6} . Максимальное относительное удлинение магнито-стрикционного стержня может достигать 10^{-4} . Магнито-стрикционный эффект уменьшается с ростом температуры и при некоторой характерной для данного материала температуре, называемой точкой Кюри, он делается равным нулю. Ненамагниченный стержень изменяет свои размеры с частотой двойной по сравнению с частотой переменного тока, поскольку изменение размеров стержня не зависит от направления тока в катушке, а зависит только от его величины. При соответствующем подмагничивании стержень колеблется с частотой, равной частоте тока. Как правило, стержень заставляют колебаться с частотой, совпадающей с частотой его собственных колебаний, которую можно определить по формуле

$$f = \frac{2,5 \cdot 10^6}{l} \text{ гц},$$

где l — длина стержня в миллиметрах.

Стержень закрепляется по середине в точке, которая является узлом, в то время как на концах стержня возникают пучности колебаний. Очень короткие стерженьки трудно закреплять в катушке; поэтому с помощью магни-

¹ Об этих материалах см.: У. Мэзон, Пьезоэлектрические кристаллы и их применение в ультраакустике, Изд. иностр. лит-ры, 1952; В. А. Красильников, Звуковые волны, ГТТИ, 1951.

тострикционных генераторов, использующих собственные частоты стержней, можно получать лишь относительно низкочастотные ультразвуковые колебания, примыкающие к области слышимых звуков. В качестве материала для изготовления магнитострикционных излучателей применяют в основном никель, железо и некоторые сплавы этих металлов, так, например, «инвар» (36% Ni, 64% Fe), «пермендюр» (49% Fe, 49% Co и 2% V) и др.

При работе мощного излучателя стержень быстро нагревается и поэтому его приходится специально охлаждать. Часто излучатель изготавливается в форме трубки. Такой излучатель требует меньше материала, его легче охлаждать, и есть указания, что колебания полого вибратора при прочих равных условиях более интенсивны,

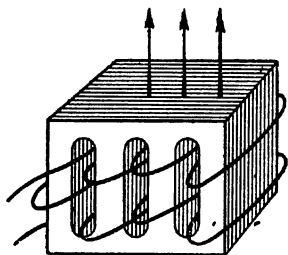


Рис. 31. Магнитострикционный вибратор, напоминающий собой трансформатор.

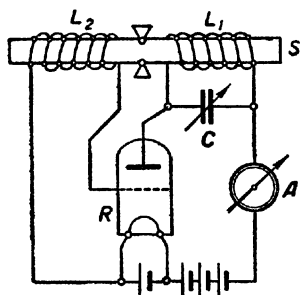


Рис. 32. Схема устройства магнитострикционного генератора.

чем колебания сплошного. Излучатели не круглого сечения обычно набирают из отдельных полос магнитострикционного материала. Полосовой вибратор, напоминающий собой трансформатор, изображён на рисунке 31. Для увеличения количества излучаемой акустической энергии конец стержня снабжают иногда наконечником в виде широкой пластины из алюминия. Ламповые генераторы, предназначенные для возбуждения магнитострикционного стержня, по существу не отличаются от пьезоэлектрических генераторов.

На рисунке 32 приведена схема простого магнитострикционного генератора. Нами для устройства такого генератора была использована маломощная генераторная

лампа типа Г-36. Катушки L_1 и L_2 имели внутри прямоугольное сечение размером 10×10 мм. Ёмкость конденсатора C была 1500 μF , причём параллельно ему могли присоединяться конденсаторы постоянной ёмкости 500, 1000, 1500 и 2000 μF . Катушка L_2 имела 1600 витков проволоки 0,4 мм диаметром. Катушка L_1 была сменной. Отдельные катушки имели от 1600 до 3600 витков, что давало возможность генерировать колебания, начиная от звуковых частот до 25 кГц. Пользуясь магнитострикционным генератором, удобно получать слышимые звуки высокой частоты и большой мощности.

Схема магнитострикционного генератора, позволявшего получать очень мощные колебания, изображена на рисунке 33. Никелевый вибратор 1 помещался в специ-

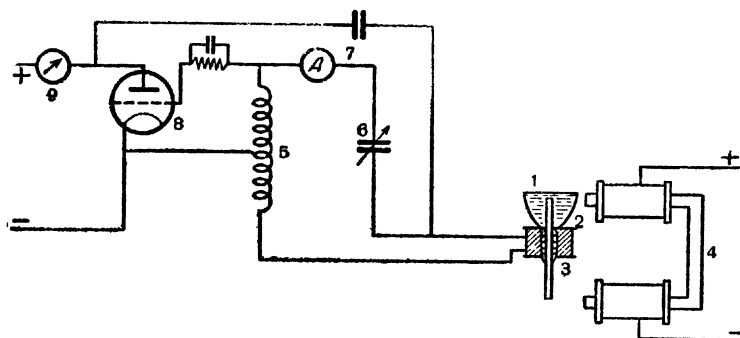


Рис. 33. Магнитострикционный генератор для получения мощных ультразвуковых колебаний.

альную катушку 3, создававшую переменное магнитное поле. Для того чтобы обеспечить лучшую передачу ультразвуковой энергии, вибратор закреплялся непосредственно в пробке, вставленной в дно сосуда 2, наполненного озвучиваемой жидкостью. Электромагнит 4 служил для подмагничивания магнитострикционного стержня. Для получения интенсивных ультразвуковых колебаний использовали мощную генераторную лампу 8, например ГК-3000. Сила тока измерялась приборами 7 и 9. Изменением ёмкости 6 колебательный контур (состоящий из ёмкости и самоиндукции 5) настраивался в резонанс с собственными колебаниями стержня, причём над поверхностью жидкости возникал фонтан высотой 8—10 см.

КАК ОБНАРУЖИТЬ УЛЬТРАЗВУКОВЫЕ ВОЛНЫ

Опыты с ультразвуками естественно начать с демонстрации изменения чувствительности человеческого уха с изменением частоты звука. Для этой цели можно воспользоваться свистком Гальтона, который несложно из-

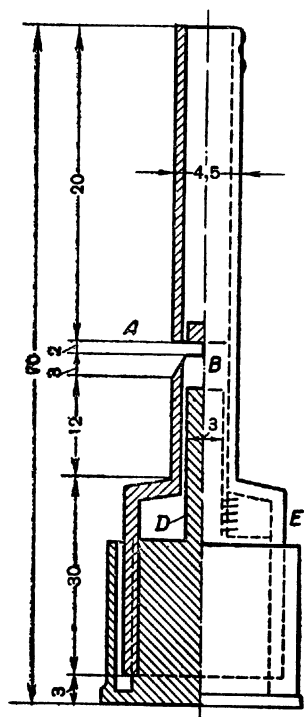


Рис. 34. Чертеж, поясняющий устройство свистка Гальтона.

готовить в любой механической мастерской. Необходимый для этого чертёж изображён на рисунке 34. Свисток состоит из двух разъёмных частей, соединённых вместе винтовой нарезкой. Щелевое сопло *A* полукруглой формы приходится против остро заточенного края прорези *B*, напоминающей прорезь в обычном свистке. Если соединить обе половины свистка, то, вращая винт, можно изменять глубину, на которую стержень *D* погружён внутрь полости резонатора, изменяя тем самым собственную частоту колебаний свистка. На наружной поверхности цилиндра *E* наносят деления, указывающие положение стержня внутри камеры резонатора. Необходимые для изготовления размеры указаны на чертеже, хотя следует иметь в виду, что они могут быть изменены.

Для демонстрации особенностей человеческого уха заставляют свисток звучать, присоединив его к какому-либо баллону со сжатым воздухом или же просто создавая необходимое давление с помощью лёгких. При этом одновременно равномерно вращают на-

ружную часть свистка, всё глубже вдвигая стержень. Тон звука непрерывно возрастает, и одновременно как бы уменьшается сила звука. Надо обратить внимание на то, что наблюдаемое уменьшение силы звука — только кажущееся и вызвано в действительности уменьшением

чувствительности уха по отношению к более высоким звукам. При некотором положении стержня свисток перестаёт звучать. Излучаемая им упругая волна оказывается лежащей за пределами слышимых звуков. Утверждение, что свисток излучает звуковую волну хотя мы её и не слышим, может быть встречено с сомнением. Поэтому совершенно необходимо продемонстрировать наличие ультразвуковых волн в воздухе в том случае, когда они полностью неслышимы для человека.

Для этой цели используют способность упругой волны оказывать давление на препятствие, расположенное на её пути. Можно доказать, что звуковая волна, падающая на бесконечную поверхность, расположенную нормально к направлению распространения волны и полностью отражающую звук, оказывает на неё давление, выражаемое уравнением:

$$P = [\gamma - 1] \frac{2E}{a},$$

где E — количество акустической энергии, падающее в единицу времени на единицу поверхности, a — скорость звука и γ — отношение теплоёмкости при постоянном давлении к теплоёмкости при постоянном объёме $\frac{C_p}{C_v}$.

Способность волны оказывать давление не является свойством, специфическим для звуковых волн, но присуща любому волновому процессу. В частности, и световые волны, падая на какую-либо поверхность, также оказывают на неё давление. Продemonстрировать световое давление очень трудно в силу ничтожно малой абсолютной величины его. Поэтому можно рекомендовать на уроке, посвящённом давлению света, показать учащимся давление звуковых волн и объяснить аналогию между давлением света и звука. Для обнаружения звукового давления служит прибор, впервые применённый для измерения коэффициента поглощения звука П. Н. Лебедевым и называемый акустическим радиометром. Изготовить акустический радиометр несложно. Простой прибор, с помощью которого легко можно обнаружить ультразвуковую волну в воздухе по создаваемому ею давлению, изображён на рисунке 35. Для его изготовления медную проволоку диаметром 1,5—2,0 мм сгибают в виде буквы П; ножки делают длиной приблизительно 4—5 см, а пе-

реклядинку 6—7 см. За середину перекладинки согнутая проволочка припаяется к подставке так, чтобы боковые отрезки образовывали с горизонтом угол 20—30° (см. рисунок). К концам ножек припаяется тонкая металлическая нить диаметром, равным 20—30 μ ¹.

Для того чтобы нить имела необходимое натяжение, удобно бывает, припаяв один конец её, прикрепить к дру-

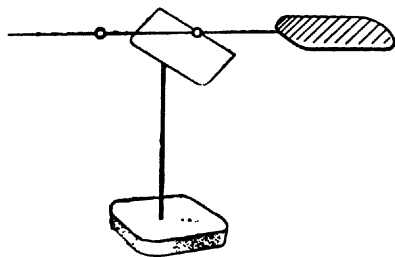


Рис. 35. Ультразвуковой радиометр.

гому концу какой-либо замазкой, например воском или сургучом, небольшой груз и перекинуть нить через вторую перекладинку, к которой она должна быть припаяна. Место спая надо предварительно облудить. Грузик натянет нить, и будет достаточно прикоснуться паяльником с капелькой

олова, чтобы нить припаялась. Теперь необходимо припаять проволочку, несущую подвижное крылышко радиометра. В качестве таковой мы пользовались медной проволочкой диаметром 0,15 мм и длиной 7 см, причём конец, служащий противовесом, имел длину 6 см. Место будущего спая медной проволочки предварительно тщательно облуживается с таким расчётом, чтобы образовалась маленькая капелька олова; затем проволочка берётся пинцетом и осторожно подносится снизу к нити, а сверху прикасаются горячим паяльником. Надо стремиться осуществить спай минимальным количеством олова, утяжеление радиометра нежелательно, так как подвижная система должна быть возможно легче. Крылышко можно изготовить из тонкого слюдяного лепестка, отщепив его лезвием безопасной бритвы от куска обычной слюды. Приклеивать крылышко к перекладинке можно разными способами; вполне надёжно оно прикрепляется, например, обычным воском. Для этого на слюдяной лепесток кладут крупинку воска и, взяв пинцетом, подносят

¹ Пригодная для этой цели проволока употребляется для намотки катушек телефонной трубки. Имея испорченную трубку, можно отмотать необходимое количество проволоки с катушки.

лепесток к перекладинке и одновременно другой рукой приближают горячий паяльник, расплавляют воск и дают ему вновь застыть, следя за тем, чтобы проволочка, к которой прикрепляется крылышко, была погружена в воск. Можно рекомендовать опереть руку на какую-либо подставку, так как она не должна дрожать. После того как крылышко прикреплено, остаётся только уравновесить его.

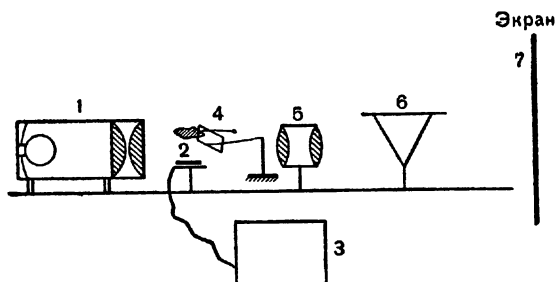


Рис. 36. Схема опыта для демонстрации давления звуковых волн.

Если перевешивает свободный конец, то просто осторожно отрезают ножницами маленькие кусочки проволоки до тех пор, пока крылышко не примет горизонтального положения. В том случае, когда перевешивает крылышко, можно рекомендовать, слегка приподняв его, капнуть на свободный конец проволоочки расплавленным воском, дать стечь избыточному количеству, а затем, согнув кусочек тонкой проволоочки в виде наездника, посадить его на свободный конец. Осторожно перемещая наездник вдоль проволоки, добиваются равновесия, после чего, поднеся горячий паяльник, слегка расплавляют воск и тем закрепляют наездник в желательном положении.

Демонстрировать с помощью описанного радиометра звуковое давление лучше в проекции на экран. Для этого на школьной оптической скамье располагают приборы так, как это изображено на рисунке 36. В качестве источника света использован осветитель от проекционного фонаря 1. Кварцедержатель с колеблющейся пластинкой 2 укрепляется на штативе и присоединяется к ультразвуковому генератору 3. Над колеблющейся пластинкой располагается радиометр 4, изображение которого с помощью объектива 5 проецируется на экране 7. Желательно на

пути светового луча расположить поворотную призму 6 и перевернуть изображение на экране. В противном случае зрители будут наблюдать отклонение крылышка радиометра вниз благодаря тому, что проекционный фонарь даёт перевернутое изображение. Ультразвуковые колебания в воздухе затухают весьма быстро, поэтому крылышко радиометра следует располагать возможно ближе к пластинке, на расстоянии 1—1,5 см. Особенно уменьшать это расстояние нельзя, так как иначе слюдяной лепесток электризуется и притягивается к пластинке. Получив на экране чёткое изображение радиометра, включают накал лампы генератора и, когда она нагреется, специальным рубильником присоединяют к генератору источник высокого напряжения. Как только возникнет ультразвуковая волна, крылышко резко отклонится кверху.

При отсутствии отклонения следует повернуть ручку конденсатора переменной ёмкости в ультразвуковом генераторе до одного из крайних положений, а затем, медленно вращая её, приближаться к тому положению, при котором, согласно предварительным наблюдениям, возникают колебания кварцевой пластинки. Если и в этом случае ожидаемый эффект отсутствует, то надо проверить работу генератора и, если она происходит нормально, изменить контакт с верхней поверхностью пластины: уменьшить или увеличить силу, с которой язычок контакта придавливается к пластинке.

При правильном устройстве отброс крылышка должен быть хорошо виден и составлять примерно 30—40°.

В описанном опыте отклонение радиометра вызвано двумя причинами: звуковым давлением и акустическим ветром. При количественных исследованиях радиометр защищают от действия акустического ветра с помощью тончайшей мембраны, пропускающей звуковые колебания, но не пропускающей воздушных потоков. Работа с такого рода приборами значительно сложнее, и при качественной демонстрации можно не стремиться исключать действие акустического ветра.

Величина звукового давления обычно определяется по отклонению крутильных весов, измеряемому с помощью зеркального отсчёта. Упрощённый прибор для подобного рода измерений представлен на рисунке 37. В качестве нити, по закручиванию которой определяют давление звука, нами была взята металлическая ленточка, пред-

назначенная для шитья воинских знаков различия. Длина нити приблизительно 10—12 см. Изготовление радиометра производится, как описано выше. К изготовленному прибору в месте соединения нити с перекладиной приклеивается лёгкое заркальце. Необходимое зеркальце

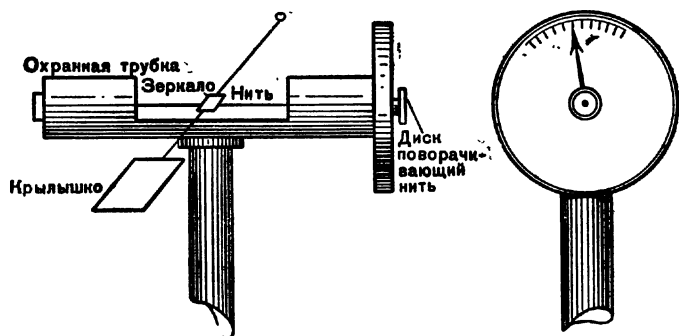


Рис. 37. Схема устройства демонстрационного ультразвукового радиометра с зеркальцем.

можно приготовить самому, посеребрив обычное покровное стеклышко для микроскопических наблюдений и разрезав его примерно на четыре части. Посеребрив несколько стёклышек, можно даже просто разломать их пинцетом и выбрать подходящий для поставленной цели кусочек.

Схема демонстрации звукового давления с помощью радиометра с зеркальцем изображена на рисунке 38. Осветитель 1 легко изготовить из короткой трубочки диаметром ~ 2 см и длиной ~ 5 см. С одного конца трубочки вставляется обычная пробка, в которой закрепляется лампочка, употребляемая для освещения шкалы радиоприёмника. Эти лампочки удобны, поскольку требуют для накала 6,3 в, и потому просто присоединяются к накалу ламп ультразвукового генератора. Зайчик от зеркальца радиометра 2 отбрасывается на стену. Смещения зайчика, вызванные звуковым давлением, весьма значительны (метр и больше). Так как демонстрация преследует цель качественного обнаружения звукового давления, можно рекомендовать направлять световой луч под острым углом к стене, поскольку в этом случае смещения зайчика больше. Для обнаружения ультразвуковых волн

в жидкости можно воспользоваться характерной рябью, возникающей на поверхности в том месте, где ультразвуковой луч выходит из жидкости в воздух. При этой демонстрации пластинку не следует погружать глубоко в жидкость; вполне достаточно, чтобы толщина слоя над

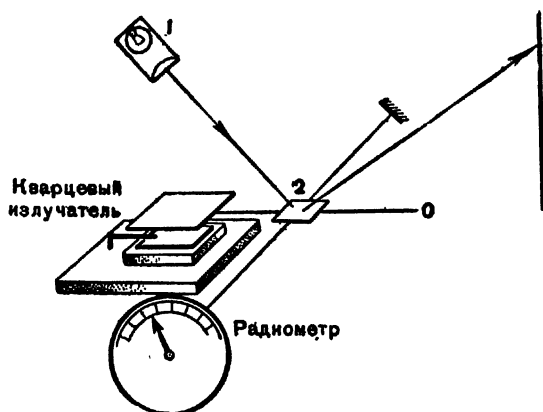


Рис. 38. Демонстрация измерения звукового давления.

поверхностью пластинки составляла несколько миллиметров. Включив ультразвуковой генератор, медленно вращают ручку конденсатора переменной ёмкости до тех пор, пока частота колебаний контура не совпадёт с частотой собственных колебаний пластинки. В этот момент на поверхности жидкости возникнет хорошо различимая рябь.

Чтобы сделать наблюдаемую картину видимой в большой аудитории, возникающую на поверхности рябь проецируют на экран. Это можно сделать, осветив поверхность жидкости косо падающим пучком света и отбросив отражение на экран (рис. 39). При возникновении колебаний наблюдаемая на экране картина заметно меняется. Однако в этом случае, вероятно, в результате дисперсии световых лучей при прохождении слоя жидкости переменной толщины, возникающего над пластинкой, изображение на экране делается окрашенным в спектральные цвета. Объяснить возникновение окраски не всегда просто, и, кроме того, это отвлекает внимание от наблюдения основного явления.

Гораздо более эффектно можно наблюдать то же явление, если спроектировать с помощью объектива изображение поверхности жидкости (рис. 40). Вся установка собирается на простой оптической скамье. Осветитель от проекционного фонаря ставится наклонно на таком рас-

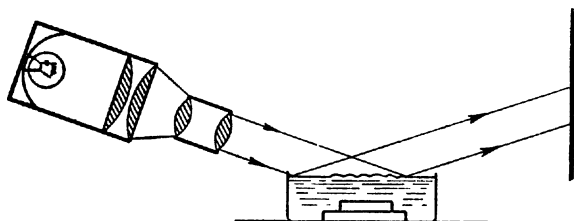


Рис. 39. Демонстрация ряби, возникающей на поверхности жидкости при распространении ультразвука.

стоянии, чтобы сечение светового луча на поверхности жидкости примерно совпадало с размером кварцевой пластинки. Слой жидкости над пластинкой 2—3 мм. С помощью объектива и поворотной призмы на экране получают изображение поверхности жидкости, расположенной над пластинкой. При возникновении в жидкости ультразвуковых колебаний на экране, благодаря увеличению, получается красивая картина, напоминающая морские волны. Можно обратить внимание на то, что границы ряби совпадают с размерами колеблющейся

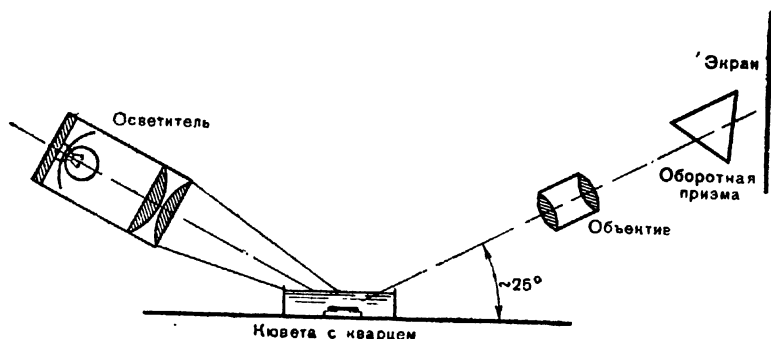


Рис. 40. Схема установки для проектирования изображения поверхности жидкости на экране.

пластинки и резко ограничены по краям, что вызвано малым расхождением ультразвукового луча.

Ещё более эффектно сделать видимым весь ход луча в жидкости. Это можно осуществить различными способами, из которых мы опишем несколько несложных.

Если расположить излучающую грань кварцевой пластинки параллельно свободной поверхности жидкости и воспользоваться не очень мощным ультразвуком, то в пространстве между пластинкой и границей жидкости возникает стоячая волна, которую чрезвычайно просто сделать видимой. Для этого кварцевая пластинка располагается в небольшой кювете из плексигласа. Размер применяемой нами кюветы был $4,5 \times 6 \times 6$ см. Такую кювету легко изготовить самому, вырезав стенки её из куска плексигласа и склеив их раствором того же плексигласа в дихлорэтано или клеем БФ-2 (конечно, не нагревая кювету) ¹.

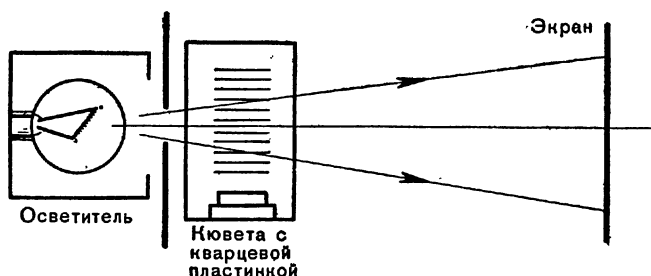


Рис. 41. Схема установки для получения теневого изображения стоячей ультразвуковой волны.

Схема для демонстрации стоячих волн изображена на рисунке 41. В качестве источника освещения используется лампочка с прямой нитью, располагаемой параллельно излучающей поверхности пластины и экрану. Лампочка помещается в кожух, снабжённый не очень широкой щелью, параллельной нити. Лучше расположить лампочку возможно ближе к кювете. Расходящийся конусообразно луч света направляют на экран. При воз-

¹Удобное приспособление для склейки кювет описано в статье: К. В. Чматов, Н. Иванова, П. Соколова, Заводская лаборатория, 8, 1016, 1947.

никновении стоячей ультразвуковой волны на экране будут видны чередующиеся светлые и тёмные полосы, вызванные периодическими изменениями коэффициента преломления жидкости при распространении в ней ультразвуковой волны. При налаживании этой демонстрации можно рекомендовать передвигать экран, меняя угол, под которым световой луч падает на него, добиваясь более эффектного изображения поля. Лампочки с прямой нитью обычно бывают маломощными, и для того чтобы этим методом получить яркую картину поля, можно заменить нить лампочки, интенсивно освещённой щелью, как это изображено на рисунке 42. При таком располо-

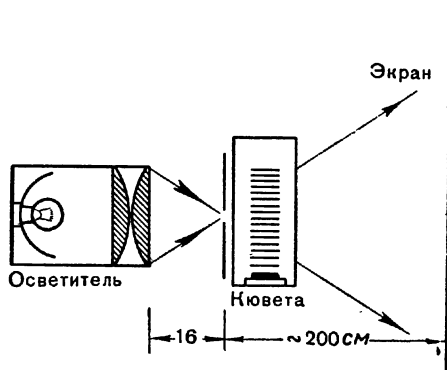


Рис. 42. Использование щели для получения теневого изображения стоячей волны.

жении опыта изображение поля может демонстрироваться в небольшой аудитории сразу для всех слушателей. Кювету, как и раньше, следует располагать возможно ближе к щели. Ещё более чёткая картина звукового поля получается, если воспользоваться схемой, изображённой на рисунке 43. Свет от источника фокусируется при помощи конденсора K на диафрагме D , имеющей точечное отверстие. Расходящийся из диафрагмы световой луч объективом O_1 превращается в параллельный пучок, на пути которого располагается прозрачная кювета с колеблющейся пластинкой. С помощью объектива O_2 на экране получают изображение внутренней части кюветы. Для этого в на-

полняющую кювету жидкость, как раз над кварцевой пластинкой, опускается короткий кусочек проволоочки. Перемещая объектив O_2 , получают на экране чёткое её изображение, которое будет наблюдаться при необходимом для успешной демонстрации расположении объектива. При возникновении стоячей ультразвуковой волны на экране будут хорошо видны чередующиеся тёмные и свет-

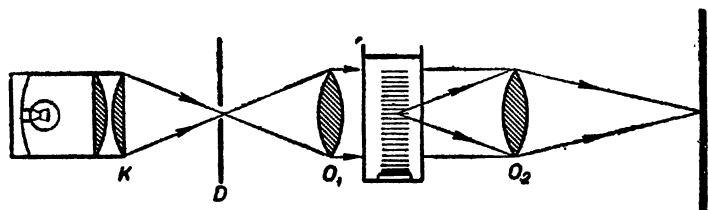


Рис. 43. Схема установки для получения изображения стоячей волны.

лые полосы, соответствующие областям сжатия и разрежения в звуковой волне, т. е. волновым поверхностям. Если не пользоваться оборотной призмой, изображение будет перевёрнутым.

Для нахождения правильного положения объектива O_1 можно рекомендовать следующий приём. За объективом O_1 ставят вертикально плоское зеркало и затем перемещают объектив до тех пор, пока изображение отверстия, полученное на правой стороне диафрагмы D , благодаря отражению лучей света от зеркала, не совпадёт с самим отверстием. При правильном расположении объектива O_1 изображение должно точно уложиться в отверстие.

В некоторых случаях наблюдаемое описанным методом изображение ультразвукового поля состоит из ряда лучей, образованных чередующимися светлыми и тёмными полосами. Это объясняется особенностями колебания кварцевой пластинки, поверхность которой, строго говоря, не движется наподобие поршня, как это часто предполагается. Одновременно с поршнеобразным движением кварцевая пластинка совершает изгибные колебания. Зависит характер колебаний и от особенностей устройства контактов. Все эти обстоятельства могут приводить иногда к большой неоднородности ультразвукового поля.

Для получения изображения стоячей или проходящей звуковой волны чаще всего пользуются методом «тёмного поля». Схема этого метода изображена на рисунке 44. В качестве источника света L лучше пользоваться точечной лампой, хотя удовлетворительные результаты можно получить с любой проекционной лампой. Свет от

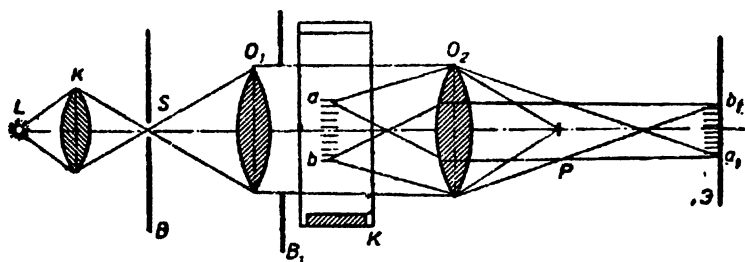


Рис. 44. Схема опыта для наблюдения ультразвуковых волн по методу тёмного поля.

источника с помощью конденсора K собирается на щели диафрагмы B , установленной в главном фокусе линзы O_1 (правильное положение линзы находится так же, как это описано в предыдущем методе). Полученный параллельный пучок света защищается от попадания рассеянных лучей экраном B_1 . Этот экран, диафрагма B и по возможности все непрозрачные детали установки покрываются матовым чёрным лаком для уменьшения рассеяния световых лучей.

На пути параллельного светового пучка располагают прозрачную кювету с колеблющейся пластинкой (расстояние между кюветой и линзой O_1 значения не имеет). Прошедший через кювету луч фокусируется линзой O_2 . Фокусное расстояние этой линзы не должно быть ни очень мало, ни очень велико. Хорошие результаты получаются при применении линзы с фокусным расстоянием F от 15 до 40 см. Метод не требует применения линз с особенно высокими оптическими свойствами. Диаметры линз O_1 и O_2 определяют размер изображения. Линзой O_2 с успехом может служить объектив от школьного проекционного аппарата. С помощью этой линзы получают изображение щели в точке F . Эту точку находят, перемещая вдоль светового луча кусок белой

бумаги до тех пор, пока не получат изображение щели наименьшей ширины.

Расположив в точке F зачернённый экран P , совпадающий по форме и размерам со щелью, можно поглотить все световые лучи так, что за экраном P света не будет. Если создать в кювете ультразвуковую волну, то это вызовет оптическую неоднородность среды, в результате которой некоторая часть лучей отклонится и не соберётся в фокусе линзы O_2 , а следовательно, и не будет задержана экраном P .

Отклонённые лучи создадут на экране \mathcal{E} изображение ультразвукового поля av , которое в том случае, если в жидкости не возникает стоячих волн, имеет вид более или менее ровной светлой полосы. Для определения расстояния, на котором следует располагать экран \mathcal{E} , убирают экран P и, опустив в кювету тоненькую проволочку, перемещают экран \mathcal{E} до тех пор, пока на нём не получится чёткое изображение проволочки. В случае стоячей волны изображение поля будет представлять последовательность чередующихся светлых и тёмных полос. Такое же изображение можно получить и для проходящей волны, если только воспользоваться стробоскопическим освещением, т. е. освещением, яркость которого периодически изменяется. Простейший стробоскоп можно осуществить, загородив источник света вращающимся диском с отверстиями. Однако таким способом можно получить прерывистое освещение только небольшой частоты. Для наблюдения же проходящей волны необходимо, чтобы частота изменения яркости света совпадала с частотой ультразвуковой волны. В этом случае максимум освещённости будет совпадать с одним и тем же положением волны, и последняя будет казаться как бы «застывшей». При наблюдении ультразвуковых волн стробоскопирование осуществляется при помощи элемента Керра¹, модулируемого напряжением от того же генератора, который применяется для получения ультразвуковых колебаний. Существуют и иные способы получения изображения ультразвукового поля, на которых мы не имеем возможности останавливаться и с которыми можно познакомиться по специальной литературе (8).

¹ Об устройстве элемента Керра см. К. А. Путилов, Курс физики, т. II, 1945.

ГЛАВА 4

ИЗМЕРЕНИЕ СКОРОСТИ И ПОГЛОЩЕНИЯ УЛЬТРАЗВУКА

При исследовании распространения ультразвука в каком-либо веществе обычно измеряется или скорость распространения ультразвуковых волн или же коэффициент поглощения их в том веществе, в котором они распространяются. Измерение скорости распространения ультразвука методически проще и может быть выполнено, как правило, с большей точностью, чем измерение поглощения.

Применяемые для определения скорости ультразвука методы можно разделить на две группы: электромеханические и оптические. В последние годы в практику ультраакустических измерений вошли так называемые импульсные методы, при использовании которых измеряется скорость распространения и поглощение веществом сравнительно короткого ультразвукового сигнала. Обладая в некоторых случаях существенными преимуществами, импульсные методы требуют сложной радиотехнической аппаратуры.

Из электромеханических методов наибольшее распространение получил метод ультразвукового интерферометра. Этот метод даёт возможность исключительно точно измерять скорости звука.

В ультраакустическом интерферометре, как показано на рисунке 45, на некотором расстоянии от колеблющейся кварцевой пластинки 1 располагают плавно перемещающийся рефлектор 2 (об устройстве рефлектора речь будет идти ниже), плоскость которого параллельна излучающей поверхности пластинки. Достигшая рефлектор ультразвуковая волна отражается от него и падает на излучающую кварцевую пластинку. В результате отражения от рефлектора в пространстве между пластинкой и рефлектором фактически распространяются две встречные волны одинаковой частоты. При перемещении рефлектора в результате сложения этих волн будут периодически возникать стоячие волны. Возникновение стоячих волн, в свою очередь, сказывается на работе кварцевой пластинки. Когда расстояние между кварцем и рефлектором равно целому числу полуволн, возникает

как бы «застопоривание» колебаний пластинки. При изменении расстояния на четверть длины волны колебания соответствуют максимальным значениям отдаваемой мощности. Если рефлектор движется равномерно, приближаясь или удаляясь от кварца, то условия, соответствующие максимуму отдаваемой кварцем мощности, будут возникать периодически через промежутки, равные

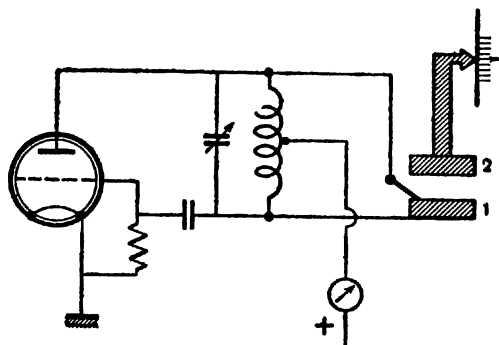


Рис. 45. Принцип работы интерферометра.

половине длины волны ультразвука. Изменения в условиях колебания кварцевой пластинки, в свою очередь, вызывают изменения целого ряда величин, характеризующих колебательную систему в целом; так, например, при этом изменяется сила анодного тока в генераторе, к которому присоединена кварцевая пластинка, напряжение на её обкладках, сила тока, текущего через кварц, и т. д. Поэтому обнаружить периодическое возникновение стоячих волн, при перемещении рефлектора ультразвукового интерферометра, можно различными способами. Проще всего это сделать, следя за изменением величины постоянной слагающей анодного тока. Эти изменения силы тока невелики, и для их измерения необходим прибор с чувствительностью 10^{-6} А. Так как сам по себе анодный ток измеряется миллиамперами, измерительный прибор приходится включать по компенсационной схеме (рис. 46). Первоначально прибор G шунтируется реостатом $R_{ш}$, сопротивление которого подбирается применительно к имеющемуся гальванометру и только после того, как анодный ток приблизительно скомпенсирован, шунт отключают. В качестве реостатов R_1 и R_2 удобно использо-

вать радиолюбительские проволочные потенциометры, $R_1 \sim 5000 \Omega$, $R_2 \sim 100-200 \Omega$.

Откладывая показания гальванометра вдоль оси ординат, а вдоль оси абсцисс расстояние между колеблющейся пластинкой и рефлектором, получим синусоидаль-

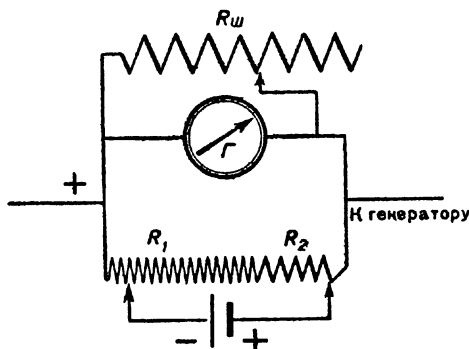


Рис. 46. Схема компенсации анодного тока при интерферометрических измерениях.

ную кривую. Расстояние между двумя соседними максимумами на такой кривой равняется половине длины волны ультразвука. Измерив перемещение рефлектора l , соответствующее образованию n максимумов (обычно от 30 до 50), находят длину волны λ из соотношения:

$$\lambda = \frac{2l}{n}. \quad (1.3)$$

Зная длину волны ультразвука λ и частоту колебаний генератора f , можно подсчитать скорость ультразвука по формуле

$$a = f \cdot \lambda. \quad (2.3)$$

Ультразвуковой интерферометр нетрудно изготовить. Если ультразвуковая волна распространяется в каком-либо газе, то следует помнить, что в этом случае большое значение имеет устройство верхнего контакта, который можно рекомендовать делать, как показано на рисунке 20. Перемещение рефлектора надо отсчитывать с точностью до сотых долей миллиметра, и поэтому оно производится при помощи микрометрического винта. Рефлектор не должен иметь вращательного движения.

Интерферометр, пригодный для измерения скорости и поглощения звука в воздухе, можно устроить, воспользовавшись штативом от старого микроскопа. Для этого из микроскопа вынимают окуляр и объектив и в тубус вставляют рефлектор интерферометра, как это показано на рисунке 47. Рефлектор интерферометра обычно вы-

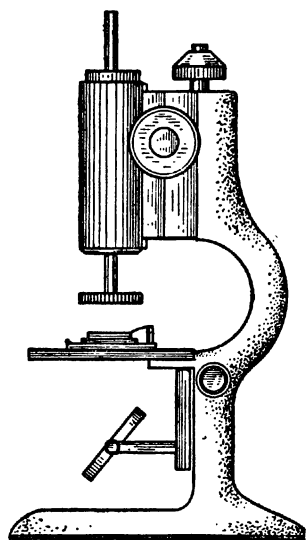


Рис. 47. Простой интерферометр.

тачивают из металла, например из латуни. Однако, если это затруднительно, отражающую плоскость рефлектора можно вырезать из куска зеркального стекла и приклеить жидким стеклом или клеем БФ к стеклянной палочке. В последнем случае надо следить за тем, чтобы отражающая плоскость рефлектора не отвалилась и не упала на кварцевую пластинку. Последние весьма хрупки и легко ломаются. Способ укрепления штока рефлектора в тубусе микроскопа не имеет принципиального значения и зависит от возможностей и находчивости экспериментатора. Колеблущуюся кварцевую пластинку располагают на столике микроскопа. Расстояние между рефлектором и излучающей поверхностью составляет около

одного сантиметра. Необходимо добиться параллельности между излучающей поверхностью пластинки и отражающей плоскостью рефлектора. Отсутствие параллельности между кварцем и рефлектором может быть причиной появления добавочных максимумов так называемых «сателлитов» на кривой, изображающей изменение силы анодного тока ¹.

¹ Как показал П. Е. Краснушкин, основной причиной появления сателлитов является неоднородность колебаний кварцевой пластинки. Отдельные участки её поверхности колеблются с различной амплитудой. В результате возникает сложное волновое движение, вызывающее появление сателлитов. Подробно об этом см. (3).

При правильном расположении рефлектора относительно колеблющейся пластинки изменения силы анодного тока при перемещении интерферометра будут наибольшими. Этим обстоятельством пользуются при наладке интерферометра.

Частота собственных колебаний пластинки толщиной 2 мм составляет $1,44 \cdot 10^6$ гц, и соответствующая волна имеет в воздухе при 20° длину $\lambda \approx 0,24$ мм, так что максимумы анодного тока будут отстоять на расстоянии примерно 0,12 мм друг от друга. Для отсчёта 20 максимумов понадобится перемещение рефлектора на расстояние 2,4 мм. Это перемещение можно осуществить, воспользовавшись имеющимся на микроскопе микрометрическим винтом. Для того чтобы точно измерить перемещение, необходимо снабдить головку микрометрического винта указателем и укрепить специальную шкалу, по которой производить отсчёт.

Ещё более простая конструкция интерферометра, пригодного для измерения скорости и затухания ультразвука в газах, изображена на рисунке 48. Рабочая камера изготовлена из стекла и состоит из двух половин, соединённых друг с другом при помощи ртутного затвора 4, состоящего из желобка, наполненного ртутью, в которую опущены края верхней половины прибора. Нижняя половина, в которой находится колеблющаяся кварцевая пластинка 2, укреплена на подставке, положение которой может изменяться при помощи уравнильных винтов. Контакты, подводящие переменное напряжение к кварцевой пластинке, впаяны в стеклянные трубочки 6, наполненные ртутью. Соединение двух частей сосуда при помощи ртутного затвора выполняет два назначения: во-первых, оно даёт возможность, вращая уравнильные винты 7, изменять расположение кварца по отношению рефлектора, добиваясь параллельности между излучающей поверхностью пластинки и отражающей поверхностью рефлектора, и, во-вторых, позволяет очень быстро, подняв верхнюю половину сосуда, в случае необходимости заменить кварцевую пластинку или же изменить устройство контакта.

Рефлектор интерферометра 5, как это видно из чертежа, укреплен в верхнем конце короткой стеклянной трубочки, нижний конец которой снабжён круговым поплавком 1, плавающим на поверхности ртути, налитой в более широкую трубку. Уровень ртути в трубке можно плавно

изменять, приливая в неё ртуть из бюретки 8. Взяв узкую бюретку и только слегка приоткрывая кран, можно заставить рефлексор очень плавно подниматься вверх и при этом весьма точно отсчитывать его перемещение.

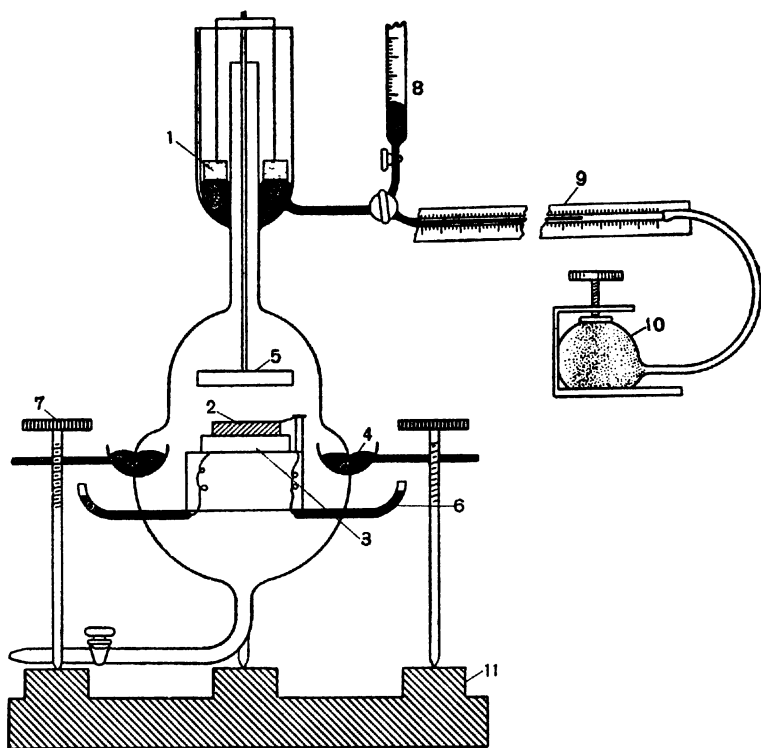


Рис. 48. Интерферометр с поплавковым перемещением рефлексора.

Мы находили удобным соединять широкую трубку с ртутью и капиллярную трубочку 9, свободный конец которой замыкался грушей 10. Сдавливая грушу винтом и заставляя ртуть перемещаться вдоль капиллярной трубочки 9, легко осуществить вертикальное движение рефлексора. Отсчёт перемещения отличается в этом способе большой точностью. Действительно, отмечая положение мениска в капиллярной трубке с точностью до 1 мм, можно легко определить перемещение рефлексора с точ-

ностью до тысячных долей миллиметра. Так, если диаметр капиллярной трубки 1 мм, внешний диаметр трубки с ртутью 50 мм, а внутренний 5 мм, то смещению мениска на 1 мм будет соответствовать перемещение рефлексора всего на $4 \cdot 10^{-4}$ мм.

Устройство интерферометра для жидкостей в принципе не отличается от устройства интерферометра для газов.

Мы опишем только одну очень простую модель, в которой в качестве рефлексора используется свободная поверхность жидкости. Отражение упругих колебаний от границы жидкости с воздухом или каким-либо другим газом происходит более полно, чем от границы её с твёрдым телом. В самом деле, коэффициент отражения звука от границы вода—воздух составляет 0,999, а от границы вода—сталь 0,925.

В случае использования отражения от свободной поверхности жидкости задача достижения параллельности между излучающей плоскостью пластины и рефлексором сводится по существу к проблеме горизонтального расположения кварцевой пластинки, так как свободная поверхность жидкости всегда располагается горизонтально. Если кварцевая пластинка зеркально полирована, то для этой цели можно воспользоваться интерференционной картиной, наблюдаемой в тонком слое жидкости, покрывающем кристалл. Ещё проще той же цели можно добиться следующим приёмом: измерительный сосуд вместе с кварцевой пластинкой укрепляется на подставке с уравнительными винтами. Установив излучающую пластинку приблизительно горизонтально, измеряют разницу между максимальным и минимальным значением постоянной слагающей анодного тока, которая наблюдается при изменении уровня жидкости. Вращая уравнительные винты, добиваются наибольшего значения этой разницы, которое будет наблюдаться при параллельном расположении поверхности жидкости и пластинки. Изменение уровня жидкости можно осуществить или приливанием и отливанием её или же погружением в жидкость какого-либо твёрдого стержня. Последним способом удаётся изменять уровень жидкости очень плавно и чрезвычайно точно измерять это изменение.

Применение интерферометра с отражением от свободной поверхности жидкости даёт возможность произ-

водить акустические измерения в интервале частот от 1 до 6 мГц. В тех случаях, когда желательно исследовать изменение скорости звука при изменении состояния вещества, например температуры, иногда пользуются интерферометрами с постоянным расстоянием между кварцем и рефлектором. Описание этих приборов можно найти в специальных руководствах (3,8). Ультразвуковой интерферометр можно с успехом применить в учебном практикуме или в работе физических кружков.

Демонстрировать действие ультраакустического интерферометра в большой аудитории можно или воспользовавшись электронным усилителем или же демонстрационным зеркальным гальванометром. В случае применения усилителя его присоединяют вместо измерительного прибора в компенсационной схеме, изображённой на рисунке 46, а усиленные изменения силы тока демонстрируют с помощью специального демонстрационного гальванометра. Медленно вращая ручку интерферометра, обращают внимание слушателей на периодические движения стрелки гальванометра. Для пояснения необходимо иметь чертёж интерферометра. В случае применения зеркального гальванометра его надо предварительно зашунтировать, так как чувствительность подобных приборов обычно много больше требуемой.

С помощью интерферометра хорошо демонстрировать принцип определения скорости и поглощения звука. Измерение скорости ультразвука следует начать с определения частоты колебаний кварца, для чего можно воспользоваться тем, что скорость ультразвука в воздухе хорошо известна. При разных температурах скорость ультразвука в сухом воздухе может быть подсчитана по уравнению

$$C = C_0 \sqrt{\frac{T}{273,16}},$$

где T — абсолютная температура, а C_0 — скорость звука при 0°C , равная 332 м/сек.

При измерении скорости звука в жидкостях для калибровки генератора следует промерить скорость звука в одной из жидкостей, для которой такие данные имеются. Полезные в этом отношении сведения приведены в таблице 2.

Т а б л и ц а 2

| № п/п. | Вещество | Плотность при 20° С | Скорость звука при 20° С | Темпера- турный коэфф. скорости звука |
|-----------|------------------------------------|------------------------|--------------------------------|---|
| 1 | Ацетон | 0,791 | 1190 | 3,8 |
| 2 | Бензол | 0,879 | 1324 | 4,66 |
| 3 | Глицерин | 1,261 | 1923 | — |
| 4 | Метиловый спирт | 0,791 | 1123 | 2,9 |
| 5 | Нитробензол | 1,203 | 1477 | 2,5 |
| 6 | Октан | 0,702 | 1192 | — |
| 7 | Пентан — н | 0,626 | 1020 | — |
| 8 | Изопентан | 0,62 | 992 | 4,8 |
| 9 | Пропиловый спирт | 0,806 | 1221 | — |
| 10 | Ртуть | 13,595 | 1451 | — |
| 11 | Сероуглерод | 1,262 | 1158 | — |
| 12 | Толуол | 0,866 | 1237 | 3,2 |
| 13 | Хлорбензол | 1,104 | 1289 | 3,7 |
| 14 | Хлороформ | 1,488 | 1002 | 3,4 |
| 15 | Четырёххлористый углерод | 1,594 | 943 | 3,0 |
| 16 | Этиловый спирт | 0,789 | 1170 | — |

Надо помнить, что при изменении нагрузки на кварц, нарушении режима работы генератора, приближении каких-либо массивных предметов и т. п. частота колебаний генератора может изменяться. Поэтому при точных измерениях частоту генератора следует проверять при помощи волномера.

Простейший резонансный волномер представляет собой колебательный контур (рис. 49), состоящий из конденсатора переменной ёмкости и катушки самоиндукции. Обычно волномер снабжается несколькими сменными катушками. Катушку самоиндукции приближают к катушке ультразвукового генератора и, медленно вращая ручку конденсатора переменной ёмкости, отмечают момент загорания индикаторной лампочки или момент максимального отклонения измерительного прибора, что отвечает совпадению частот генератора и волномера. Пользуясь приложенными к волномеру таблицами, можно по показанию шкалы определить длину волны генератора и соответственно частоту колебаний. Резонансный волномер нетрудно изготовить самому. Наиболее ответственной частью его является хороший конденсатор переменной ёмкости. Прокалибровать волномер можно на кафедре электротехники и радиотехники в любом техническом ВУЗе.

Как указано выше, при распространении ультразвука, наряду со скоростью распространения волны, большое значение имеет поглощение энергии веществом. По мере удаления от источника амплитуда колебаний ультразвуковой волны уменьшается по экспоненциаль-

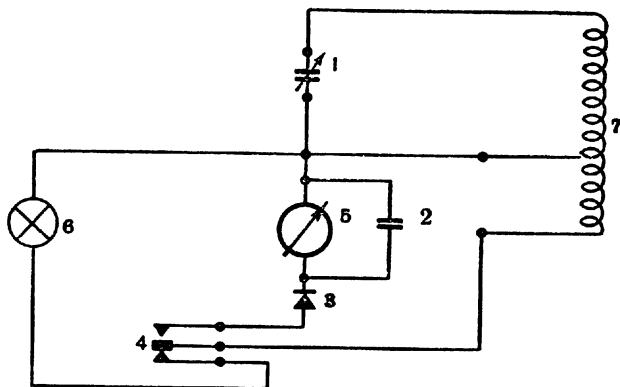


Рис. 49. Схема устройства резонансного волномера. 1 — конденсатор переменной ёмкости — 2000 см; 2 — конденсатор 2000 см; 3 — купроксный детектор; 4 — переключатель; 5 — миллиамперметр 5 мА; 6 — лампочка-индикатор; 7 — катушка самоиндукции.

ному закону. Амплитуда U_0 , после того как волна пройдёт путь x , уменьшится до величины U_x , определяемой уравнением $U_x = U_0 e^{-\alpha x}$, где α — коэффициент поглощения.

Поскольку интенсивность звука I пропорциональна квадрату амплитуды; для изменения интенсивности звука будет справедливо соотношение —

$$I_x = I_0 e^{-2\alpha x},$$

где I_0 — начальная интенсивность и I_x — та же величина на расстоянии x .

Коэффициент поглощения звука является важной физической характеристикой вещества.

С помощью интерферометра поглощение звука можно измерять только в газах. В жидкостях ввиду малости коэффициента поглощения измерение его с помощью интерферометра затруднительно.

На рисунке 50 изображено изменение силы анодного тока генератора в зависимости от перемещения рефлектора

в том случае, если интерферометр находится в газе, характеризуемом большим коэффициентом поглощения. По мере удаления рефлектора разница между максимальным и минимальным значением анодного тока уменьшается. Это обстоятельство связано с затуханием ультразвуковой волны в пространстве между колеблю-

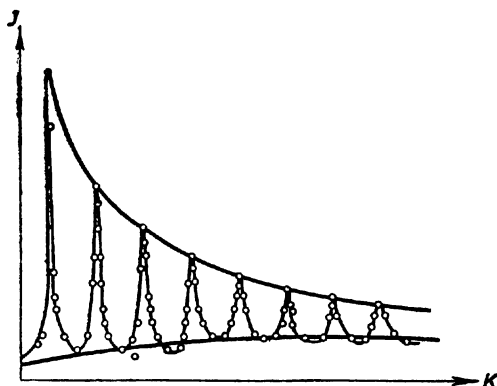


Рис. 50. Изменение анодного тока генератора в зависимости от перемещения рефлектора.

щейся кварцевой пластинкой и рефлектором. Точный расчёт на основании интерферометрических измерений коэффициента поглощения звука в газе сложен и требует выполнения специальных условий (3,8). Ориентировочно коэффициент поглощения звука можно подсчитать, пользуясь формулой

$$\alpha = \frac{2,303}{2(x'' - x')} \lg \frac{J'_{\max} - J'_{\min}}{J''_{\max} - J''_{\min}},$$

где J'_{\max} , J'_{\min} , J''_{\max} , J''_{\min} — соответственно максимальные и минимальные величины анодного тока, измеренные при расстояниях между рефлектором и кварцем, равных соответственно x' и x'' .

Можно рекомендовать ограничить рассмотрение вопроса о поглощении звука полукачественной демонстрацией. Более подробно с методикой определения коэффициентов поглощения звука можно познакомиться в специальной литературе.

Наряду с электромеханическими методами в практике ультразвуковых измерений широко применяются оп-

тические способы измерения скорости и поглощения звука. Так, например, для определения скорости звука оптическим методом можно воспользоваться изображением ультразвукового поля, полученным по одному из описанных в предыдущей главе способов. Схема очень простого способа представлена на рисунке 51. Жидкость, в кото-

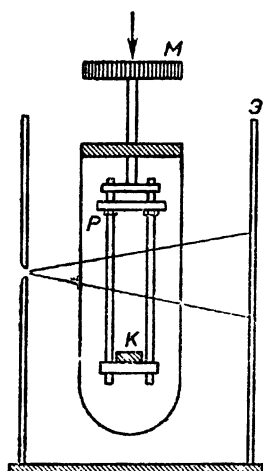


Рис. 51. Простой оптический метод измерения скорости звука.

рой измеряется скорость звука, помещается в пробирку. Туда же опускаются специальные салазки вместе с укрепленными на них кварцем *К* и рефлектором *Р*. Вращая микрометрический винт *М*, можно перемещать салазки как одно целое. При помощи щелевого источника света на матовом экране *Э* получают изображение стоячей ультразвуковой волны в виде системы параллельных светлых и темных полос. При перемещении салазок светлые и темные полосы перемещаются вдоль экрана вверх или вниз в зависимости от направления вращения винта. Отметив положение одной из полос, вращают микрометрический винт до тех пор, пока через сделанную отметку не пройдет определенное число полос. Измерив пе-

ремещение салазок и зная соответствующее число полос, прошедших через сделанную на экране отметку, можно определить длину ультразвуковой волны. Умножив найденную таким образом длину волны на частоту колебаний генератора, получим скорость звука в исследуемой жидкости.

Для той же цели можно воспользоваться изображением стоячей ультразвуковой волны, полученным по методу темного поля. В этом случае в жидкости над колеблющейся пластинкой помещают специальную марку-эталон, служащую масштабом. В качестве таковой можно взять кусочек проволоочки или металлической фольги определенной длины. Пользуясь эталоном, легко определить длину волны и далее скорость ультразвука в различных жидкостях. Чаще всего для определения скорости и погло-

щения ультразвука в жидкостях используется явление дифракции света на ультразвуковой решётке.

Чередующиеся сжатия и разрежения, возникающие при распространении ультразвуковой волны в жидкости, вызывают периодические изменения коэффициента преломления последней. Поэтому ультразвуковая волна, полученная в жидкости, налитой в кювету с прозрачными плоскопараллельными стенками, является по отношению к световому лучу как бы дифракционной решёткой. Роль постоянной решётки играет длина волны λ . Ультразвуковая решётка это объёмная решётка «слоистого» типа. Более подробно с теорией дифракции света на ультразвуковой решётке можно познакомиться в специальных работах (1, 3, 8).

Для определения скорости ультразвука этим методом собирают установку, схематически изображённую на рисунке 52. Расходящийся пучок света от источника L со-

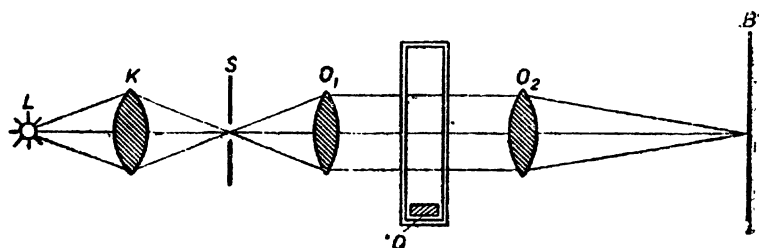


Рис. 52. Схема опыта для наблюдения дифракции света на ультразвуковой решётке.

бирается конденсором K на узкой щели S . Выходящий из щели расходящийся луч объективом O_1 превращается в параллельный. На пути параллельного пучка располагается прозрачная кювета с жидкостью, в которой находится колеблющаяся кварцевая пластинка Q . Длиннофокусная линза O_2 собирает лучи на экране B .

При отсутствии ультразвука на экране наблюдается изображение щели. Если заставить кварц совершать колебания, то, помимо основного изображения, хорошо видны изображения спектров первого, второго, третьего, а иногда и более высоких порядков. В тех случаях, когда пользуются белым светом, спектральные изображения окрашены. Для того чтобы избежать этого, применяют

светофильтры. Условием, определяющим возникновение спектра n -го порядка при дифракции света на ультразвуке, будет выполнение соотношения

$$\lambda \sin q_n = n\lambda_{onm},$$

где λ — постоянная решётки, равная длине звуковой волны,

q_n — угол отклонения луча в спектре n -го порядка,

λ_{onm} — длина световой волны и $n = 1, 2, 3, \dots$ — порядок спектра.

После некоторых упрощений для определения длины волны ультразвука λ получается соотношение

$$\lambda = nF \frac{\lambda_{onm}}{d_n},$$

где d_n — расстояние от центрального изображения до изображения щели в спектре n -го порядка и F — главное фокусное расстояние линзы O_2 .

λ_{onm} легче всего определить, заменив кювету с жидкостью обычной дифракционной решёткой с известной постоянной.

d_n определяют или визуально с помощью отсчётного микроскопа, или же изображение спектра фотографируют и расстояние между спектрами измеряют на микрофотометре или компараторе. Зная частоту колебаний генератора и определив длину волны, вычисляют скорость звука, пользуясь обычной формулой.

В качестве источника света при подобных измерениях чаще всего пользуются ртутной лампой (например выпускаемой нашей промышленностью лампой ПРК-4). Наблюдая дифракцию света, можно определять скорость ультразвука в жидкостях, прозрачных изотропных твёрдых телах и в парах, если давление последних превосходит несколько атмосфер.

При определении поглощения ультразвука используется то обстоятельство, что для звуков малой мощности, при которых наблюдаются только спектры первого порядка, интенсивность последних линейно зависит от амплитуды ультразвуковой волны. Таким образом, измерив интенсивность спектров первого порядка на двух различных расстояниях от колеблющейся кварцевой пластинки, можно вычислить коэффициент поглощения ультразвука

в исследуемой жидкости. Сравнение интенсивности спектров первого порядка производят или при помощи фотоэлементов или же микрофотометрируя изображение спектров на фотоплёнке. В первом случае специальным экраном поглощают неотклонённые световые лучи (изображение щели 0-го порядка) и направляют на фотоэлемент лучи, образующие спектры ± 1 -го порядка. Измеряя силу тока, возникающего в фотоэлементе, можно определить интенсивность дифракционных спектров, а следовательно, и интенсивность ультразвука. Во втором случае с помощью микрофотометра определяют почернение, соответствующее изображению спектров ± 1 -го порядка, которое пропорционально их интенсивности. Для фотографирования спектров следует пользоваться наиболее высокочувствительной плёнкой.

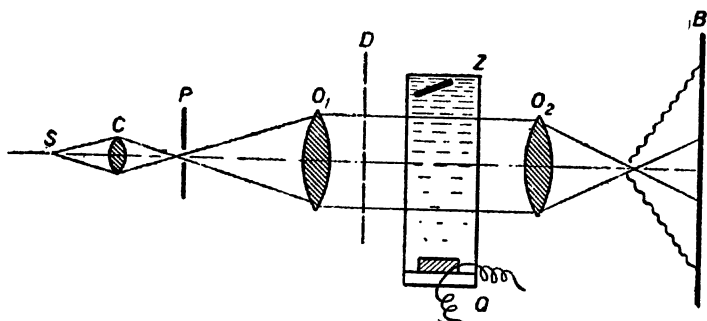


Рис. 53. Установка для измерения поглощения ультразвука в жидкостях оптическим методом.

Схема простого и точного метода измерения поглощения ультразвука изображена на рисунке 53. На пути параллельного пучка света, полученного, как описано выше, располагается диафрагма D с рядом параллельных щелей. Прошедшие через щели лучики пронизывают кювету, в которой в направлении, перпендикулярном световому лучу, распространяется ультразвуковая волна. Для того чтобы избежать отражения волны от поверхности жидкости, применяется поглотитель Z (стеклянная вата, губчатая резина, различные пористые пластинки и т. д.). С помощью объектива O_2 на экране B получают изображение сразу всех щелей. Когда в жидкости распространяется ультразвук, на экране, помимо основных изображений

наблюдаются спектры ± 1 -го порядка. Полученная таким образом дифракционная картина фотографируется, а затем с помощью микрофотометра определяется интенсивность спектров первого порядка на разных расстояниях от колеблющейся пластинки (1, 3, 8).

Используя для изучения распространения ультразвука явление дифракции света, надо следить за тем, чтобы направление параллельного пучка света было строго перпендикулярно направлению ультразвуковой волны. Нарушение перпендикулярности обнаруживается по разной интенсивности спектров $+1$ -го и -1 -го порядка. Для получения чёткой дифракционной картины следует всячески уменьшать количество рассеянного света, поэтому рекомендуется применять экраны, покрытые матовой чёрной краской. Надо избегать неравномерного нагрева жидкости, который вызывает дополнительную неоднородность в ней, и потому пользоваться ультразвуком малой интенсивности, включая кварцевую пластинку только на время экспозиции. Мощные ультразвуковые колебания, поглощаясь жидкостью, быстро нагревают её, в жидкости возникают потоки с различной температурой и потому с различной плотностью. Явление дифракции света на ультразвуке можно продемонстрировать в сравнительно большой аудитории, но для этого схема расположения опыта изменяется. Свет от источника фокусируется на сравнительно узкой щели *A* (рис. 54). С помощью объ-

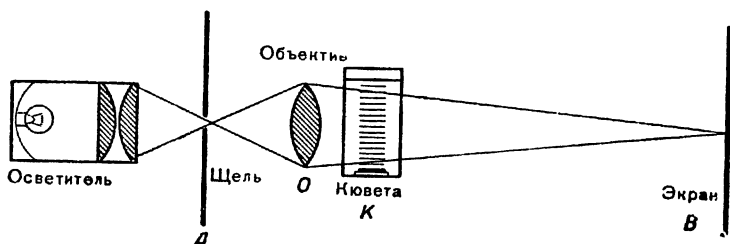


Рис. 54. Схема опыта для демонстрации дифракции света на ультразвуковой решётке.

ектива *O* на экране *B* получают изображение щели. На пути лучей, идущих от объектива, располагается кювета с колеблющейся кварцевой пластинкой *K*. Излучающая поверхность пластинки должна быть параллельна щели.

Рефлектор, отражающий ультразвуковую волну, не обязателен. В качестве жидкости для демонстрации выбирают такую, скорость звука в которой по возможности невелика (например CCl_4). Лучше пользоваться тонкой (0,5 мм) кварцевой пластинкой или же возбуждать пластинку на одной из гармонических частот. Для получения монохромического света необходим светофильтр. Удобно пользоваться жёлтым фильтром, потому что в этом случае получается хорошо видимое в аудитории изображение. При включении ультразвука ясно различимы ди-

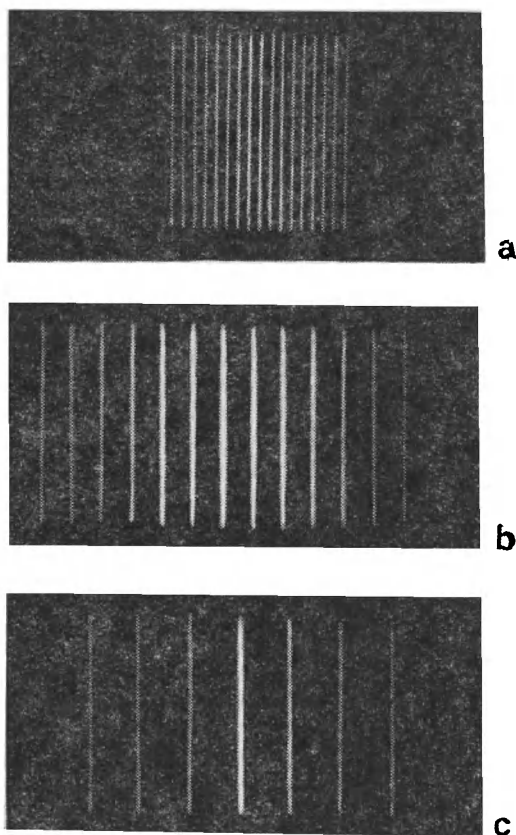


Рис. 55. Дифракция света на ультразвуковой решётке в ксилоне.

фракционные спектры нескольких порядков. Можно то же явление продемонстрировать и следующим образом: на пути светового луча располагают зеркало и фокусируют изображение на экране, поставленном в конце аудитории. Это позволяет расположить установку на лекционном столе и в то же время иметь сравнительно большое расстояние между дифракционной решёткой и экраном. На рисунке 55 приведена фотография полученных с помощью ультразвука дифракционных спектров. Средняя светлая линия на этих фотографиях соответствует изображению щели, полученному в результате преломления недифрагированных лучей. По обе стороны от неё видны дифракционные изображения щели. На верхней фотографии (а), полученной при самой низкой — основной — частоте, дифракционные изображения расположены ближе всего друг к другу.

Средняя фотография (в) получена при частоте в три раза, а нижняя (с) в пять раз большей, чем основная частота. Дифракционные изображения на этих фотографиях расположены соответственно в три и пять раз дальше друг от друга.

Поглощение ультразвука в жидкостях можно также определить, микрофотометрируя фотографическое изображение ультразвуковой волны, полученное по методу тёмного поля (з).

ГЛАВА 5

ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА УЛЬТРАЗВУКОВ

Отражение звуковых волн подчиняется тем же законам, которым подчиняется отражение световых волн. С помощью обычного графика, приводимого во всех курсах физики, можно убедиться в том, что фронт отражённой волны легко находится в результате применения принципа Гюйгенса. Однако продемонстрировать законы отражения слышимых звуков не так просто, особенно в связи с осложняющим влиянием дифракции.

Применение ультразвуков позволяет наглядными опытами доказать учащимся справедливость законов отражения упругих волн, показать поведение звукового луча при встрече с препятствием, прохождение луча через отверстие в экране и т. д.

Для наблюдения отражения от плоского зеркала ультразвуковой луч делают видимым. Этого удаётся достигнуть, воспользовавшись описанной выше прозрачной кюветой. Наполнив кювету жидкостью с относительно большой скоростью звука и расположив на её дне кварцевую пластинку, заставляют последнюю совершать колебания. В результате отражения упругой волны от поверхности жидкости в кювете возникнет стоячая волна, которая будет видна на экране в виде последовательности светлых и тёмных полос. В этих опытах удобно пользоваться не слишком тонкой кварцевой пластинкой ($d = 1,5 \text{ мм}$) с таким расчётом, чтобы светлые и тёмные полосы на экране были хорошо различимы. В начале опыта в кювету, параллельно узкой её стенке, опускают стеклянную пластинку толщиной $1,5\text{—}2 \text{ мм}$, играющую в дальнейшем роль зеркала. По ширине зеркало должно превосходить диаметр колеблющейся пластинки. Когда на экране получится чёткое изображение звуковой волны, пластинку осторожно наклоняют с таким расчётом, чтобы она образовала с осью кюветы угол приблизительно 45° (рис 56). При этом при отражении от наклонной плоскости возникают стоячие волны, параллельные отражающей поверхности. Расстояние между пучностями в этом случае равно

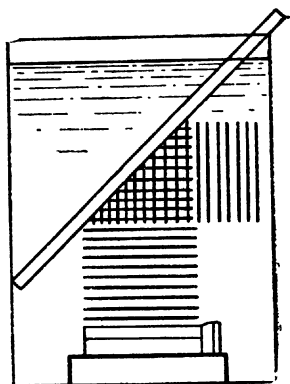


Рис. 56. Схема опыта для наблюдения отражения ультразвуковой волны от плоского зеркала.

$\frac{\lambda}{2} (\cos \varphi)^{-1}$, где φ — угол падения. Осторожно поворачивая зеркало, можно добиться получения обычной картины интерференции падающей и отражённой волны. Нам удавалось получить картину интерференции не только при стробоскопическом освещении, но и при постоянном освещении, вероятно в результате возникновения стоячих волн после отражения от боковой поверхности кюветы. Следует отметить, что в случае проходящих волн и падающая и отражённая волна видны в виде светлых лучей.

Если наклеить на пластинку различные поглощающие материалы, можно продемонстрировать их влияние на от-

ражение упругой волны. Особенно хорошо поглощает ультразвук поверхность металлической щётки. На рисунке 57, заимствованном, как и некоторые другие, из работы С. Н. Ржевкина и С. И. Кречмера (9), изображено падение ультразвуковой волны ($\lambda = 1,9 \text{ мм}$) на кусок кардоленты из стальных проволок. На рисунке ясно видно отсутствие отражения, — падающая волна полностью по-

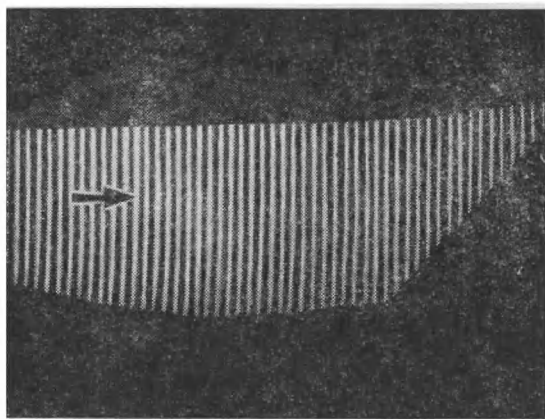


Рис. 57. Поглощение ультразвуковой волны при падении её на препятствие.

глощается. Из куска жести нетрудно изготовить цилиндрическое вогнутое зеркало, расположив которое на пути ультразвуковой волны, можно показать фокусировку последней. При этом будут ясно видны отражённые сферические волны, сходящиеся в фокусе. Фокусное расстояние равно, как легко убедиться, половине радиуса цилиндра. Согласно нашему опыту, фокусировку несложно продемонстрировать на небольшом экране, размером около 1 м^2 , пользуясь для этого обычной школьной оптической скамьей.

На той же самой установке можно наблюдать прохождение ультразвукового луча через отверстие в преграде. Последнюю изготовляют из обычной жести. Размеры её несколько превосходят размеры колеблющейся пластинки. Отверстие не следует делать очень малым. Если ультразвук распространяется в четырёххлористом углероде, то

при частоте 3 мГц в отверстии диаметром 6 мм укладывается приблизительно 15 длин волн и поэтому дифракция практически не наблюдается, расхождение луча невелико. Припаяв к тонкой проволочке небольшой кусочек жести, можно изготовить заслонку, которой по желанию закрывать отверстие в экране. Ультразвуковая волна видна в виде светлого луча, выходящего из отверстия и исчезающего при его закрывании. Опыт можно демонстрировать на относительно большом экране (рис. 58).

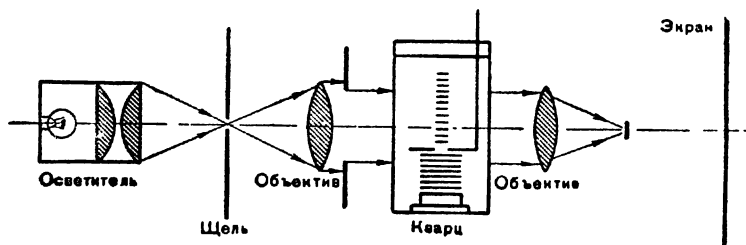


Рис. 58. Схема установки для наблюдения прохождения ультразвукового луча через отверстие в преграде.

Ультразвуками пользуются при изучении на моделях акустических свойств различных сооружений. Этот способ имеет ряд преимуществ по сравнению с другими методами. Во-первых, в этом случае мы изучаем действительно распространение звуковых, т. е. продольных, волн, в то время как при применении для моделирования поверхностных волн на воде или какой-либо другой жидкости мы имеем дело с поперечными волнами. Поэтому подобие между явлениями, наблюдаемыми на модели и имеющими место в действительности, будет при применении ультразвуков больше, чем при использовании поверхностных волн. Кроме того, применение ультразвуковых волн позволяет сохранить имеющее место в действительности соотношение между размерами волны и изучаемого сооружения, оперируя в то же время с моделями небольших размеров.

Для демонстрации моделирования акустических процессов можно показать учащимся образование акустической тени, когда на пути звуковой волны встречается колонна. Для этого отрезается кусочек стеклянной тру-

бочки диаметром около 7 мм и длиной приблизительно 30 мм. Трубочка надевается на тонкую проволоку, концы которой позволяют закрепить трубочку в жидкости над колеблющейся кварцевой пластинкой (частота колебаний $f \sim 4$ мГц). Ось трубочки совпадает с направлением светового луча и в то же время перпендикулярна направлению звуковой волны. На экране проектируется как бы сечение изготовленной таким способом модели колонны. При включении кварца возникает светлое изображение ультразвукового луча, которое за колонной сменяется тенью — областью, где звуковые колебания сильно ослаблены (рис. 59). Перед колонной видны образовавшиеся в жид-

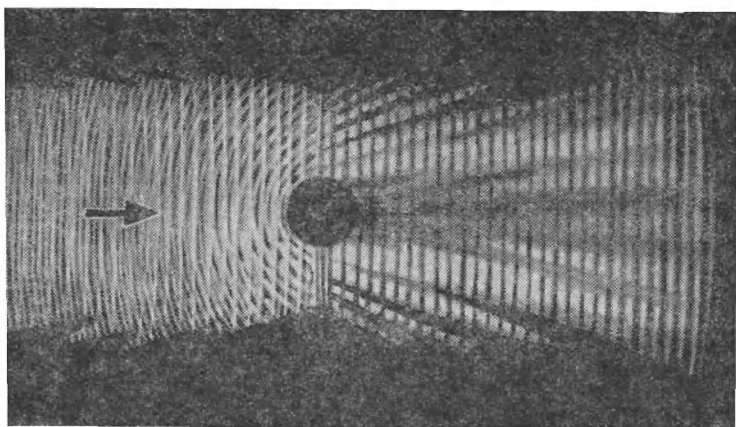


Рис. 59. Акустическая тень от колонны.

кости стоячие ультразвуковые волны. С боков от колонны образуются чередующиеся светлые и тёмные дифракционные полосы. Светлая дифракционная полоса видна и позади колонны в самом центре акустической тени.

Ещё более ярко явление дифракции выступает тогда, когда размер препятствия сравним с длиной волны. На рисунке 60 изображено прохождение ультразвуковой волны около проволоочки диаметром 1,6 мм; в этом опыте длина звуковой волны λ была равна 1,8 мм.

На фотографии хорошо видны зоны дифракции сзади проволоочки. Очень эффектную демонстрацию ультразвукового поля, создаваемого колеблющейся пластинкой,

можно осуществить, если в качестве среды, в которой распространяются колебания, взять суспензию алюминиевой пыли в ксилоле, бензоле или CCl_4 . Для того чтобы

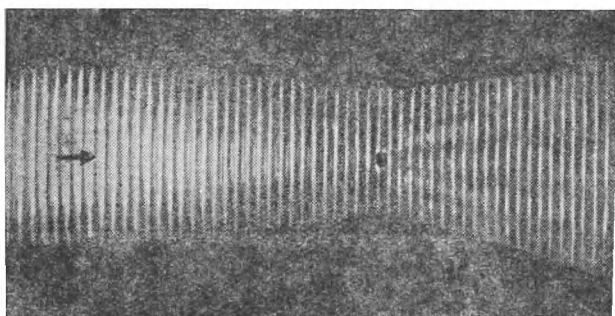


Рис. 60. Дифракция ультразвуковой волны.

избежать закорачивания электродов или искрового пробоя, кварцевую пластинку отделяют от жидкости тонкой мембраной. Изготовить мембрану можно или из алюминиевой фольги или из тонкой целлофановой плёнки. Кювету попержнему можно склеить из плексигласа.

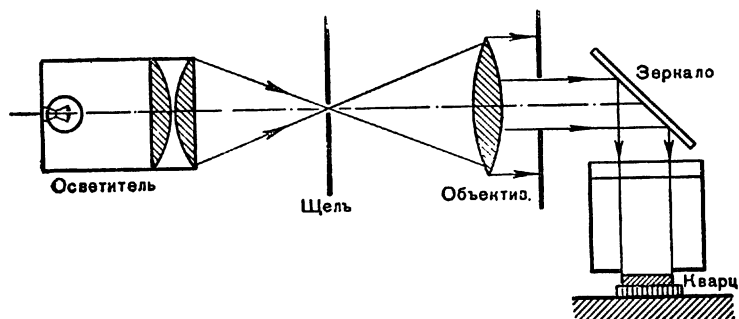


Рис. 61. Схема расположения опыта для наблюдения ультразвукового поля при помощи суспензии алюминиевой пыли.

Расположение опыта изображено на рисунке 61. Суспензия алюминиевой пыли оседает медленно, так что в течение опыта жидкость как бы состоит из серебристых

блесток. При возникновении колебаний на равномерном серебристом поле появляются тёмные лучи. Пользуясь этим приёмом, можно показать большинство из описанных выше опытов. При мощных колебаниях следует обратить внимание на движение алюминиевой пылицы. Эти движения связаны частично с конвенционными потоками, возникающими в результате нагрева жидкости, вызванного поглощением ультразвука, а частично объясняются особым явлением, о котором мы уже упоминали, так называемым акустическим ветром, сопровождающим распространение ультразвуковых колебаний. Возможность наблюдения звукового поля в данном случае объясняется тем, что отдельные пылинки алюминия имеют форму мельчайших чешуек. В звуковой волне подобные чешуйки ориентируются определённым образом. Беспорядочное расположение пылицы, обуславливающее равномерное рассеяние света, заменяется упорядоченным, которое и делает ультразвуковой луч видимым. Этот метод весьма чувствителен и используется на практике при ультразвуковой дефектоскопии.

Познакомившись с распространением упругих волн в изотропной среде, естественно перейти к рассмотрению явлений, наблюдаемых при падении ультразвукового луча на границу раздела двух сред с различными акустическими свойствами. Как известно, преломление звука на границе каких-либо двух сред вызвано тем, что скорость распространения волны в первой и во второй средах различна. Если обозначить скорость звука в первой среде a_1 , а во второй a_2 , то коэффициент преломления n будет равен отношению

$$n = \frac{a_1}{a_2}.$$

Поскольку же по определению коэффициент преломления равен отношению синуса угла падения α к синусу угла преломления β луча, постольку в зависимости от соотношения в скоростях a_1 и a_2 угол преломления может быть или меньше или больше угла падения. В первом случае преломлённый луч будет приближаться к перпендикуляру, восстановленному в точке падения луча к плоскости раздела двух сред, а во втором отходить от него. Пояснить явление преломления учащимся можно следующим примером.

Предположим, что колонна физкультурников, маршируя, подойдёт к границе, на которой твёрдый грунт сменяется песчаным. Если колонна движется в направлении, перпендикулярном к границе, то все физкультурники первой шеренги достигнут границу одновременно, в один и тот же момент вступят на песчаный грунт (рис. 62). В этом случае скорость движения уменьшится оди-

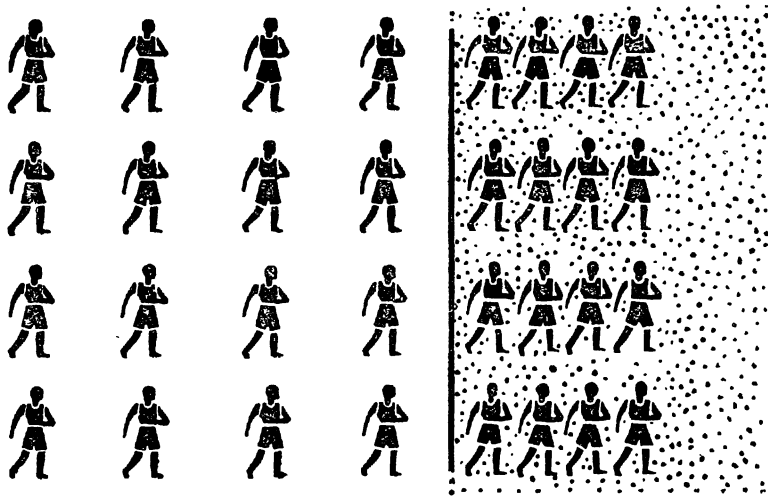


Рис. 62. Рисунок, поясняющий явления при нормальном падении луча на границу раздела.

наково для всего фронта, вторая шеренга нагонит первую, и расстояние между ними сократится. То же повторится со всеми последующими шеренгами. Направление движения при этом, однако, не изменится. Аналогично ведёт себя волна.

Если уподобить шеренги гребням волны, а промежутки между ними впадинам, то сближение шеренг будет означать сокращение расстояния между соседними гребнями или, другими словами, уменьшение длины волны. Поэтому мы можем ожидать, что при переходе в среду, в которой скорость распространения меньше, длина волны укоротится. Направление движения волны, падающей перпендикулярно на границу раздела, во второй среде останется тем же, каким оно было в первой.

Иначе будет обстоять дело, если колонна движется в направлении, косом по отношению границы раздела. В этом случае один край первой шеренги вступит на песок раньше, чем другой. Движение физкультурников, вступивших на песок, замедлится по сравнению с движением их соседей, идущих по твёрдому грунту. Край шеренги, раньше вступивший на песок, отстанет в своём движении от противоположного, и фронт движения изменится (рис. 63). Направление движения колонны на песчаном грунте

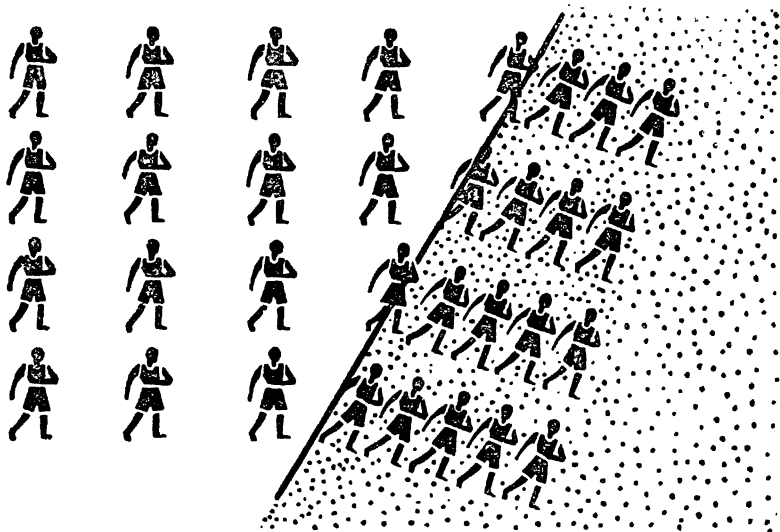


Рис. 63. Рисунок, поясняющий преломление луча.

будет отличаться от направления движения на твёрдой почве. Сходно будет вести себя и звуковой луч. Участок луча, достигший раньше границы вещества, отличающегося меньшей скоростью, отстанет в своём движении от той части луча, которая ещё не достигла границы. Фронт волны изменится, изменится и направление распространения волны — луч преломится. Если бы при переходе через границу раздела двух веществ скорость распространения волны не уменьшилась, а увеличилась, то луч преломился бы в противоположном направлении.

Особенно интересное явление наблюдается в том случае, если граница области песчаной почвы имеет форму

окружности. В этом случае больше всего замедлится движение физкультурников, идущих вдоль диаметра окружности. Чем ближе физкультурники при своём движении проходят к краям окружности, тем меньше они отстанут от своих товарищей, идущих по твёрдой почве, тем больше они обгонят тех, кто идёт через центр окружности. Пройдя по песчаной почве, шеренги окажутся вогнутыми (рис. 64). Физкультурники будут двигаться по направлению к одной точке. Про волну в этом случае говорят, что она сфокусирована.

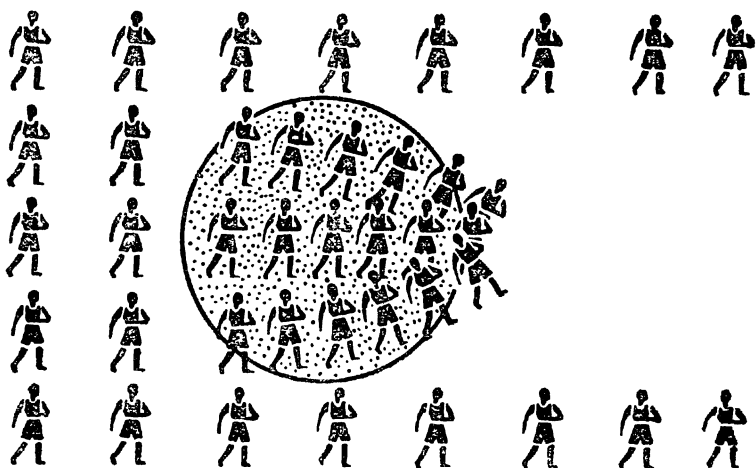


Рис. 64. Рисунок, поясняющий фокусировку волны.

Все случаи преломления ультразвуковой волны удобно продемонстрировать, сделав ультразвуковой луч видимым с помощью метода тёмного поля. Для наблюдения преломления на границе двух жидкостей можно воспользоваться кюветой, в которой кварц отделён от исследуемой жидкости тонкой мембраной. В качестве двух сред пригодны любые несмешивающиеся жидкости, так, например, четырёххлористый углерод ($a_1 = 943 \text{ м/сек}$) и вода ($a_2 = 1483 \text{ м/сек}$). Более тяжёлый четырёххлористый углерод расположится внизу, а вода сверху. Поэтому звуковой луч будет идти из среды с меньшей скоростью звука в среду с большей скоростью и, следовательно, угол падения будет меньше угла преломления. Осторожно

наклонив кювету с таким расчётом, чтобы звуковой луч оставался перпендикулярным световому лучу, но падал бы наклонно на границу раздела жидкостей, можно наблюдать явление преломления луча. Постепенно увеличивая угол падения, достигают предельного значения его, равного приблизительно 39° , при котором отражённый луч скользит по поверхности раздела.

При дальнейшем увеличении угла падения будет наблюдаться полное внутреннее отражение. Если в качестве жидкостей выбрать воду и этиловый эфир ($a = 985$ м/сек) или керосин ($a = 1324$ м/сек), то в этих случаях снизу будет располагаться вода и ультразвуковой луч будет падать на границу раздела со стороны жидкости, в которой его скорость больше; угол падения соответственно будет больше угла преломления.

Применение ультразвуков даёт возможность наблюдать преломление упругой волны в призме. Необходимую для опыта призму совсем несложно изготовить самому. Для этого необходимо вырезать из плексигласа пластинку площадью приблизительно 25×25 мм и толщиной 6—10 мм. Зажав пластинку в тиски так, чтобы края тисков совпадали с диагональю одной из боковых граней пластинки, широким напильником снимают выступающую часть её. Грубо обработанную напильником грань образовавшегося клина зачищают наждачной бумагой. При этом бумагу надо положить на какую-либо ровную поверхность, например на кусок хорошего стекла, и, взяв призму рукой, проводить обрабатываемой гранью по бумаге по возможности равномерно, прижимая к ней всю пластинку. Начинать обработку надо с более грубого номера наждачной бумаги и, когда исчезнут борозды, оставленные на поверхности призмы напильником, отполировать её тонкой наждачной бумагой. Плексиглас обрабатывается очень легко, так что изготовление призмы занимает немного времени. При желании, обработав призму полировальной пастой, можно сделать её прозрачной.

Хотя поглощение ультразвука в плексигласе и невелико, однако не следует всё же делать особенно толстых призм, так как ослабление упругой волны делает демонстрацию менее эффектной.

В качестве среды, в которой распространяется ультразвук, пригодна любая жидкость: четырёххлористый углерод, керосин, вода. Более удобно работать с непроводя-

щей жидкостью, поскольку в этом случае колеблющуюся пластинку располагают непосредственно в жидкости и изображение ультразвукового луча на экране получается более ярким. Прикрепив основание призмы к медной проволочке диаметром 1—2 мм, опускают её в жидкость и располагают так, чтобы поверхность, обращённая к колеблющейся пластинке, была перпендикулярна направлению распространения ультразвуковой волны. При этом светлый луч, который изображает на экране упругую волну, преломляется. Следует обратить внимание на то, что луч преломляется не к основанию призмы, как это мы привыкли наблюдать в оптике, а к её вершине. Это вполне понятно: скорость звука в плексигласе колеблется около 2700 м/сек и, следовательно, значительно превосходит скорость звука в любой из жидкостей. Можно сделать и такую призму, которая будет преломлять ультразвуковой луч к основанию. Для этого из плексигласа толщиной 2—3 мм вырезают полоску длиной 80—90 мм и шириной 10—15 мм. Взяв вырезанную полоску щипцами за один конец, осторожно нагревают её, пронося над пламенем газовой горелки. При некоторой сноровке можно держать полоску за один из концов просто пальцами. Нагревшись, плексиглас размягчается, и полоска начинает при покачивании изгибаться. Когда плексиглас достаточно размягчится, что можно установить только опытом, полоску надо быстро обернуть вокруг заранее заготовленного деревянного шаблонычка так, чтобы концы её сошлись вместе, образуя невысокий цилиндр. Вынув шаблон, склеивают концы полоски или раствором плексигласа в дихлорэтане или клеем БФ-2, или каким-либо другим клеящим составом. С одной стороны просверливают в стенке цилиндрика два отверстия диаметром 3—4 мм, в которые в дальнейшем надо будет вклеить стеклянные трубочки. Вставив вновь шаблон и осторожно зажав цилиндр в тиски, стачивают напильником одно из оснований так, чтобы образовался усечённый цилиндр (рис. 65). Срезанное основание обрабатывают наждачной бумагой, и затем оба основания заклеиваются тонкой алюминиевой фольгой.

Стеклянные трубочки, вклеенные в отверстие, служат для наполнения призмы жидкостью. Лучше всего наполнять призму четырёххлористым углеродом, а если его нет, то надо выбирать жидкость для наполнения призмы с

таким расчётом, чтобы различие в скоростях звука внутри призмы и в окружающей среде было возможно больше, а акустические сопротивления (произведение из скорости звука на плотность среды) обоих сред были бы

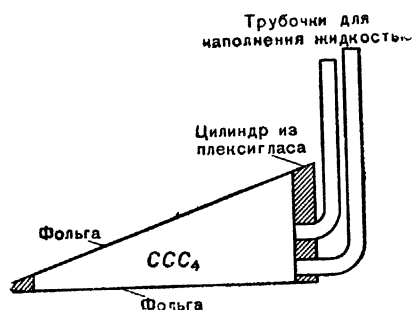


Рис. 65. Жидкостная призма.

возможно ближе друг к другу. Расположив изготовленную призму на пути ультразвукового луча, можно продемонстрировать различные случаи преломления звука.

В последние годы всё шире используются ультразвуковые линзы. Они применяются для получения акустического изображения в ультразвуковом микроскопе,

для концентрирования ультразвуковой энергии, в различных ультразвуковых устройствах и т. д. С помощью акустических линз можно увеличить интенсивность (мощность, приходящаяся на квадратный сантиметр поверхности, на которую падает волна) в 10—100 раз. Хорошим материалом для изготовления линз является плексиглас, который характеризуется сравнительно небольшим поглощением звука, прекрасно обрабатывается, имеет по отношению к большинству жидкостей большой коэффициент преломления. Для ориентировочного расчёта ультраакустических линз можно пользоваться формулой

$$f = \frac{r}{1 - \frac{a_{ж}}{a_{т}}},$$

где f — фокусное расстояние линзы и $\frac{a_{т}}{a_{ж}} = n$ — акустический показатель преломления, равный отношению скорости звука в твёрдом теле $a_{т}$ к скорости звука в жидкости $a_{ж}$.

Изготовление ультраакустической линзы несложно. Удовлетворительные результаты даёт применение для вы-

тачивания линз резца, изображённого на рисунке 66, изготовить который можно почти в любой механической мастерской. Кусок плексигласа зажимается в станок и в нём с помощью подобного резца делается сферическое углубление. Поверхность получается весьма шероховатая, так что её приходится выравнивать с помощью наждачной бумаги. Окончательную полировку производят суконным лоскутом, намазанным какой-либо полировочной пастой.

Когда обработка вогнутой поверхности закончена, линзу отрезают от куска плексигласа и обрабатывают её плоскую поверхность. Линзу следует делать возможно тоньше — вдоль главной оптической оси толщина линзы не должна превышать миллиметра. Для того чтобы получить более мощную фокусированную волну, излучающий кристалл прижимается непосредственно к плоской поверхности линзы, в то время как вторая поверхность кварца граничит с воздухом. Это легко осуществить, если приклеить к плоской поверхности линзы ободок высотой 4—6 мм, вырезанный из пластинки плексигласа с диаметром, чуть большим диаметра применяемой кварцевой пластинки. К краю ободка крепится лёгкая пружинка, прижимающая колеблющуюся пластинку к линзе. Для контакта с излучающей поверхностью кварца можно посеребрить тыльную сторону линзы или приклеить к ней тонкую металлическую фольгу.

Оба электрода соединяются с генератором гибкими проводами. Линза крепится на специальном держателе и осторожно опускается в жидкость, в которой производится фокусировка волны. Приклеенный ободок играет роль водолазного колокола, так что кварц оказывается покоящимся на воздушной подушке (рис. 67). Постепенно погружая линзу всё глубже в жидкость, можно, следя за рябью, возникающей на поверхности, наблюдать умень-

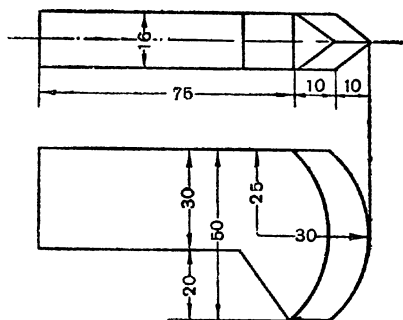


Рис. 66. Резец для изготовления ультразвуковых линз.

шение сечения ультразвукового луча и образование бугорка, который при достаточной интенсивности вызывает возникновение фонтана. Когда ультразвуковой луч оказывается сфокусированным на поверхности, глубина погружения линзы совпадает с её фокусным расстоянием. Фокусное расстояние сильно изменяется при замене одной жидкости другой.

С помощью метода тёмного поля можно сделать видимым сфокусированный ультразвуковой луч, создаваемый линзой, и демонстрировать действие линзы сразу большому числу слушателей. Выточив из плексигласа плосковыпуклую линзу, можно таким же способом наблюдать расходящийся ультразвуковой луч.

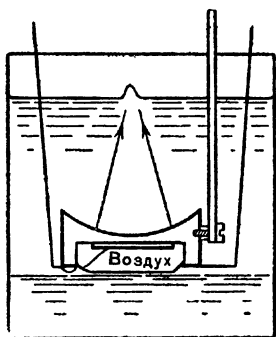


Рис. 67. Ультразвуковая линза с воздушной подушкой.

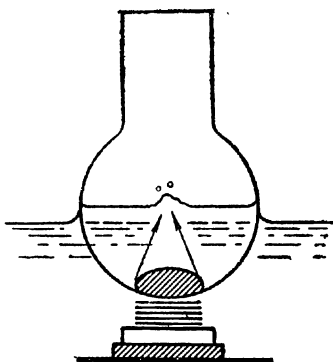


Рис. 68. Фокусировка звука каплей CCl_4 .

В литературе описаны жидкостные линзы, представляющие собой тонкие чечевицеобразные оболочки из алюминиевой фольги, наполненные жидкостью, например четырёххлористым углеродом. Поскольку скорость звука в CCl_4 значительно меньше, чем в воде, такая линза будет фокусировать ультразвуковые волны. Изготовление тонкой алюминиевой оболочки сложно, и потому можно рекомендовать жидкостную линзу продемонстрировать иначе. На конце стеклянной трубочки выдувается тонкостенный шарик. Чем тоньше стенки шарика, тем более эффектен будет опыт. На дно шарика помещается большая капля CCl_4 , которая играет роль линзы. Сверху до-

ливается небольшое количество воды, и шарик опускается в трансформаторное масло над колеблющейся кварцевой пластинкой (рис. 68). Ультразвуковые колебания проникают через стекло и фокусируются каплейкой четырёххлористого углерода так же, как фокусируются лучи света каплейкой воды. Постепенно изменяя уровень воды в шарике, можно совместить фокус ультразвуковой волны с поверхностью жидкости, на которой в этом случае возникнет бугорок, а при достаточной интенсивности ультразвука и фонтан.

В заключение укажем, как получить весьма мощные колебания, фокусируя относительно слабый ультразвук параболическим зеркалом. Так, например, в одном из опытов ультразвуковой луч сечением 15×12 мм и частотой 4,25 мГц фокусировался обычным часовым стеклом с радиусом кривизны 6,8 см.

Хотя акустическая мощность излучателя составляла всего около 2 вт, в фокальной плоскости зеркала возникал фонтан высотой около 10 см, а отдельные брызги выбрасывались на значительно большую высоту. Таким простым способом удаётся достигнуть усиления приблизительно в 70 раз, так что, подавая на кварц переменное напряжение, несколько большее 1000 в, и концентрируя ультразвуковые колебания при помощи рефлектора, можно получить в фокусе последнего давления, измеряемые десятками атмосфер.

Весьма совершенный концентратор акустической энергии можно создать, закрепив обычное, по возможности тонкое, часовое стекло в металлической коробочке таким образом, чтобы вогнутая сторона была направлена наружу, а выпуклая внутрь коробочки (рис. 69). Необходимо обеспечить герметичность всего устройства. Воздушная подушка с тыльной стороны зеркала обеспечивает почти 100-процентное отражение падающей на рефлектор акустической энергии.

Наиболее важным практическим применением ультразвуков является ультразвуковая дефектоскопия, поэтому чрезвычайно желательно познакомить учащихся с основными принципами этого способа контроля различных изделий. Как было уже указано, мы располагаем двумя способами ультразвукового контроля: методом «сквозного прозвучивания» и методом импульсной отражательной дефектоскопии. Будучи чрезвычайно простым по идее, от-

ражательный дефектоскоп трудно сконструировать, пользуясь оборудованием обычного школьного кабинета. Поэтому описание этого прибора мы не приводим, рекомендуя при желании обратиться к специальной литературе (4). Метод сквозного прозвучивания продемонстрировать весьма просто. Мы опишем два способа демонстрации этого метода контроля.

Поместив колеблющуюся пластинку на дне прозрачной кюветы и наполнив кювету соответствующей жидкостью, сделаем ультразвуковой луч видимым, воспользовавшись для этого методом тёмного поля. На пути луча расположим исследуемую деталь. Прозвучиваемая

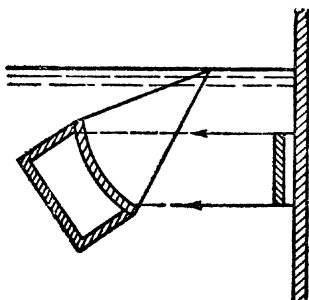


Рис. 69. Фокусировка ультразвукового луча вогнутым зеркалом с воздушной подушкой.

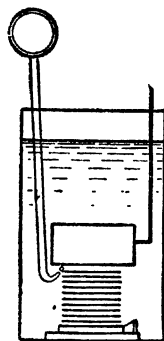


Рис. 70. Схема опыта для демонстрации метода «сквозного прозвучивания».

деталь представляет собой цилиндр из плексигласа или жести, диаметром несколько большим диаметра ультразвукового луча. Вершина цилиндра заклеена тонкой алюминиевой фольгой, основание открыто. При погружении цилиндра в кювету его надо наклонить так, чтобы внутренняя полость целиком наполнилась жидкостью. Ультразвук свободно проходит через цилиндр, и на экране ясно виден светлый луч, выходящий из его вершины.

Получив изображение прошедшего через цилиндр луча, подводят конец оттянутой глазной пипетки под основание цилиндрика (рис. 70) и, вдавливая во внутреннюю полость воздух, создают у фольги, закрывающей

вершину цилиндра, воздушный пузырь, имитирующий раковину внутри исследуемой детали. Упругие колебания отражаются от границы с воздухом, рассеиваются, и поэтому интенсивность прошедшего луча ослабевает, а как только пузырёк делается достаточно большим, наблюдаемый на экране светлый луч вовсе исчезает. Исчезновение светлого луча будет означать, что ультразвуковые колебания не проходят через деталь. В результате наличия раковины деталь сделалась непрозрачной для ультразвука. Именно так исследуется, например, качество автомобильных шин. Шина укрепляется на специальном подвесе,

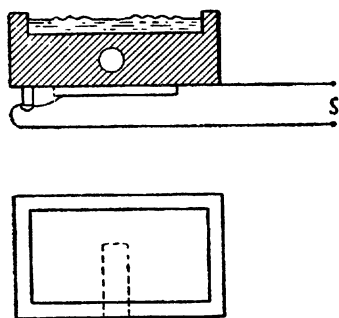


Рис. 71. Обнаружение дефекта в детали.

так что её нижняя часть погружена в жидкость, налитую в ванну. В жидкости с одной стороны шины укреплен излучатель, а с другой приёмник ультразвука. Шина медленно вращается, причём непрерывно регистрируется интенсивность прошедшего через шину ультразвукового сигнала. Дефект, имеющийся в шине, вызывает ослабление сигнала, зарегистрированного приёмником, и потому, следя за показаниями последнего, можно контроли-

ровать качество изделия.

В описанном опыте прозвучиванию подвергалась деталь, наполненная жидкостью, и это было неизбежно, так как создать на глазах у учащихся дефект в металлической детали нельзя. Для демонстрации прозвучивания твёрдой детали из плексигласа вырезают параллелепипед размером $4 \times 2,5 \times 1,2$ см; большие грани его полируются, и к одной из них приклеивается бортик. К противоположной грани с помощью пружинящего электрода прижимается колеблющаяся кварцевая пластинка. В боковой грани просверливается отверстие диаметром приблизительно 5—6 мм, по возможности ближе к грани, снабжённой бортиком. Это отверстие и является тем дефектом, который будет обнаруживаться (рис. 71).

Приготовленная таким образом модель прозвучиваемой детали устанавливается на подставочке, кварцевая пла-

стинка присоединяется к генератору, а в кювету, образовавшуюся благодаря бортикам на верхней грани параллелепипеда, наливают суспензию алюминиевой пыли в четырёххлористом углероде. Концентрация алюминиевой пыли должна быть достаточна для того, чтобы на поверхности жидкости через 2—3 минуты образовалась тонкая серебристая плёнка, которая делает поверхность жидкости подобной металлической. Осветив поверхность косо падающим пучком световых лучей и возбуждая колебания кварцевой пластинки, можно наблюдать появление ультразвуковой ряби, разделённой полоской спокойной поверхности жидкости в том месте, в котором распространяющиеся ультразвуковые колебания встречают на своём пути отверстие, т. е. дефект в толще твёрдого тела.

Часто возникает желание показать учащимся химические действия ультразвука, и потому остановимся очень кратко на тех условиях, которые следует выполнять при этих опытах.

Наиболее простым превращением, вызываемым ультразвуком, является выделение свободного йода из раствора йодистого калия. Для этих опытов требуется более мощный источник звука, обеспечивающий интенсивность порядка $0,4 \text{ вт/см}^2$.

Для озвучивания берётся $10 \text{ см}^3 \frac{1}{10} \text{ н КJ} + 10 \text{ см}^3 \text{ H}_2\text{O}$ насыщенной $\text{CCl}_4 + 5 \text{ см}^3$ 1-процентного раствора крахмала¹. При озвучивании наблюдается интенсивное потемнение. Реакция разложения йодистого калия протекает особенно легко при частотах, близких 300 кгц. При повышении частоты эффективность озвучивания снижается так, что нельзя рекомендовать пытаться наблюдать выделение йода при маломощном генераторе или тонких кварцевых пластинках.

Весьма чувствительным превращением, вызываемым озвучиванием, является следующее: на поверхности четырёххлористого углерода, содержащего небольшое количество SO_2 , образуют слой окрашенного йодом раствора КJ — крахмал. Пропускание ультразвуковых колебаний, мощность которых лежит ниже чувствительности акустического радиометра, вызывает обесцвечивание верхнего слоя жидкости в результате ускорения диффузии, определяющей протекание реакции обесцвечивания.

¹ Раствор следует подкислить слабой соляной кислотой.

Описанными опытами не исчерпываются возможные демонстрации свойства и особенностей ультразвуков. Повысив мощность ультразвуковых колебаний, можно демонстрировать процессы диспергирования вещества, действие ультразвуков на инфузории; изготовив тонкие клинья из различных материалов, можно наблюдать зависимость проходимости ультразвука от толщины пластинки и т. д.

ГЛАВА 6

ПРИМЕНЕНИЯ УЛЬТРАЗВУКОВ В ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ

Последнюю главу этой небольшой книги мы посвятим описанию некоторых возможностей, которые открываются при применении в физико-химических исследованиях ультразвуковых методов. Рассмотрим в отдельности применение ультразвуков при исследовании газообразных, жидких и твёрдых тел.

Наибольшее количество работ, посвящённых распространению ультразвука в газах, связано с изучением дисперсии скорости звука, т. е. зависимости последней от частоты звуковой волны. В настоящее время можно считать твёрдо установленным, что дисперсия скорости ультразвука в многоатомных газах связана с задержкой в распределении энергии между различными степенями свободы движения молекул. Первоначально вся акустическая энергия находится в форме энергии поступательного движения молекул. В дальнейшем часть этой энергии превращается в соответствии с принципом равного распределения энергии в энергию колебательного и вращательного движений молекул. Однако равновесное распределение энергии достигается только спустя определённый конечный промежуток времени.

Если чередующиеся сжатия и разрежения в звуковой волне будут сменять друг друга очень быстро, то установление равновесного распределения энергии не сможет следовать за изменением давления. При достаточно высокой частоте акустическая энергия вне зависимости от числа степеней свободы движения молекул газа и, следовательно, вне зависимости от их строения и возможных видов движения будет оставаться, не успевая распределять-

ся равномерно, в форме кинетической энергии поступательного движения молекул, колеблющихся в звуковой волне. Это равносильно тому, как если бы молекулы газа были способны только перемещаться и, следовательно, теплоёмкость C_v любого газа в этих условиях будет иметь значение, характерное для одноатомного газа, молекулы которого обладают тремя степенями свободы. С другой стороны, при достаточно низкой частоте равновесное распределение энергии будет успевать устанавливаться за время, соответствующее периоду звуковых колебаний, и акустическая энергия будет приходиться частично на степени свободы поступательного движения, а частично на степени свободы, связанные с колебательным и вращательным движением молекул. Теплоёмкость газа C_v в этом случае будет зависеть от строения молекулы, от того, из скольких атомов она состоит.

Скорость звука a определяется соотношением

$$a^2 = \gamma \frac{P}{\rho},$$

где: P — давление, ρ — плотность газа и γ — отношение теплоёмкости при постоянном давлении C_p к теплоёмкости при постоянном объёме C_v . Как известно из курса физики, величины C_v и C_p зависят от числа степеней свободы движения молекул, и поэтому, естественно, что при нарушении равновесного распределения энергии величина γ изменяется, а следовательно, изменяется и скорость звука. На рисунке 72 изображено изменение скорости звука в CO_2 при изменении частоты. Изучая явление дисперсии скорости звука в многоатомных газах, можно ответить на многие вопросы, интересующие физико-химиков.

Таким образом удаётся рассчитать вероятность возбуждения колебательных состояний при соударениях молекул различных газов, оценить эффективность в отношении передачи колебательной энергии соударений молекул, различающихся химическими свойствами, дипольными моментами, размерами и т. д. Молекулам некоторых газов присуще несколько колебательных состояний, и в этих случаях акустические измерения позволяют ответить на вопрос — какова вероятность возбуждения различных колебательных состояний; какие из них в данных условиях возбуждаются, а какие не возбуждаются.

Не каждое соударение молекул вызывает возникновение колебаний. Последнее наблюдается только в том случае, если одна из соударяющихся молекул движется достаточно быстро — обладает достаточно большой энергией. Энергию, необходимую для возникновения колебаний, на-

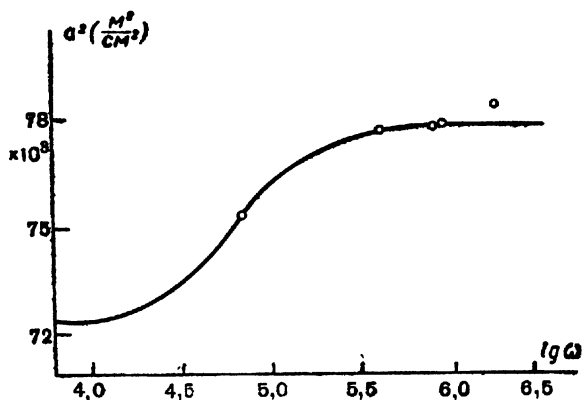


Рис. 72. Дисперсия скорости звука в CO_2 .

зывают энергией активации процесса возбуждения колебательных состояний молекулы. Эту величину можно определить, изучая зависимость дисперсии звука от температуры. Измерения в смесях позволяют оценить влияние примесей на процессы перераспределения энергии при молекулярных соударениях и т. д.

В последние годы обнаружено возрастание скорости звука в газах, наблюдаемое при малых давлениях, когда на длине звуковой волны укладывается всего 100—200 свободных пробегов. Это явление нельзя объяснить так, как это мы сделали выше, поскольку возрастание скорости наблюдается и в одноатомных газах, таких, как гелий, аргон, в которых не может идти речь о перераспределении энергии между различными степенями свободы движения молекул, так как молекулы этих газов обладают только степенями свободы поступательного движения. В этом случае дисперсия звука связана с процессами взаимодействия молекул: возникновением молекулярных комплексов. Изучение распространения звука в газах при

малых давлениях позволяет оценить вероятность возникновения и распада молекулярного комплекса.

Акустические измерения применяли для определения вероятности изменения ориентации электронного спина при соударениях некоторых молекул, для определения отношения теплоёмкостей $\frac{C_p}{C_v}$ при высоких давлениях, для изучения отклонений в поведении газов от закона идеальных газов и т. д.

Многokrатно пытались использовать акустические измерения для анализа газовых смесей. Оригинальный оптико-акустический способ анализа был предложен М. Л. Вейнгеровым.

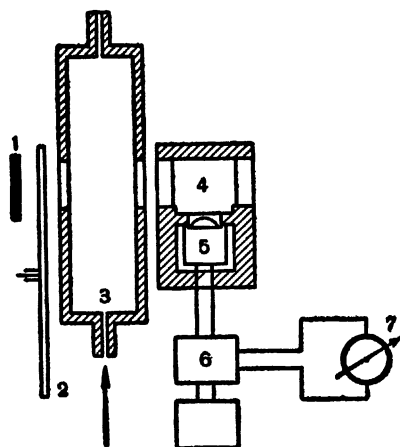


Рис. 73. Схема прибора для оптико-акустического анализа газов.

В одной из последних конструкций прибора, предназначенного для анализа по этому методу (рис. 73), излучение, создаваемое раскалённой плиткой 1, делается пульсирующим при помощи быстро вращающегося диска с отверстиями 2 и поступает в адсорбционную камеру 4, наполненную смесью газов, содержащей определённое количество примеси, поглощающей тепловые лучи.

В результате периодического нагревания в адсорбционной камере возникает звуковая волна соответствующей частоты, которая регистрируется микрофоном 5. После усиления 6 интенсивность звуковых колебаний измеряется специальным гальванометром 7. Если тепловой луч, до того как попадёт в адсорбционную камеру, заставить пройти через кювету с прозрачными окошками 3, содержащую исследуемую смесь газов, то в том случае, когда в смеси имеется примесь того же газа, который поглощает лучи в адсорбционной камере, соответствующая часть излучения будет ослаблена. Мощность звуковых колебаний, регистрируемых микрофоном, уменьшится. Про-

калибровав заранее подобный прибор, можно непосредственно по показанию гальванометра определять содержание в исследуемой смеси интересующей примеси. В тех случаях, когда определяется присутствие газов, которые не имеют перекрывающихся полос в спектре поглощения (например, CO_2 $\lambda_1 = 2,7 \mu$, $\lambda_2 = 4,3 \mu$, CH_4 $\lambda_1 = 3,31 \mu$ и $\lambda_2 = 7,7 \mu$), возможно, воспользовавшись двумя адсорбционными камерами, измерять одновременно содержание каждого из газов в смеси.

Ещё более широкие возможности открывает применение ультразвуческих методов при исследовании жидкого состояния вещества.

Чаще всего измерения скорости звука в жидкостях используют для определения адиабатической сжимаемости β_{ad} жидкостей по уравнению

$$\beta_{ad} = \frac{1}{a^2 \rho},$$

где a — скорость звука и ρ — плотность жидкости. Зная коэффициент термического расширения жидкости, можно вычислить коэффициент изотермической сжимаемости.

Подобные расчёты находят себе интересное применение при исследовании процесса взаимодействия растворённого вещества с растворителем, который называют сольватацией. В результате сольватации частицы растворённого вещества оказываются окружёнными оболочками, состоящими из молекул растворителя; эти оболочки называют сольватными оболочками. Ионы, образующиеся при растворении электролитов, создают весьма интенсивное электрическое поле. Действие этого поля эквивалентно добавочной силе, сжимающей прилегающие к иону слои воды. Возникающее при этом давление быстро падает по мере удаления от иона. И если на расстоянии 1—3 Å она исчисляется тысячами атмосфер, то уже на расстоянии 10 Å уменьшается до 8 атм. Сжимаемость жидкостей, в свою очередь, зависит от давления. Так, например, у воды при возрастании последнего от 1 до 12 000 атм сжимаемость уменьшается до 6—7% своей первоначальной величины. Поэтому сжимаемость слоёв растворителя, непосредственно прилегающего к иону, очень сильно понижена, так что со сравнительно небольшой ошибкой можно считать подобную оболочку иона несжимаемой.

Именно эти соображения и были использованы для определения на основании акустических измерений сольватации электролитов. В этих расчётах вместо сольватной оболочки рассматривался «эффективный сольватный объём», внутри которого сжимаемость вещества принималась равной нулю, в то время как в остальной массе раствора она считалась равной сжимаемости чистого растворителя. Обозначая коэффициенты сжимаемости раствора и растворителя соответственно β и β_0 , а ту часть растворителя, которая в результате действия электрического поля иона практически не сжимается, через α , получим:

$$\beta = \beta_0 (1 - \alpha).$$

Сольватация растворённого вещества h , выраженная в граммах растворителя на 1 г растворённого вещества, может быть тогда подсчитана по уравнению

$$h = \frac{\left(1 - \frac{\beta}{\beta_0}\right)(100 - g)}{g},$$

где g — количество растворённого вещества в граммах на 100 г раствора. Этим методом на основании измерения скоростей звука была определена сольватация ионов в растворах электролитов, а также различных молекул. Некоторые полученные при этом данные приведены ниже.

Т а б л и ц а 3

| Ион | H^+ | Li^+ | Na^+ | K^+ | Mg^{++} | Ba^{++} | Al^{+++} | F^- | Cl^- | Br^- |
|---------------------|-------|--------|--------|-------|-----------|-----------|------------|-------|--------|--------|
| Число сольватации . | 1—2 | 5—6 | 6—7 | 6—7 | 16 | 16 | 31 | 2 | 0—1 | 0 |

К преимуществам акустического метода определения сольватации относятся: 1) возможность производить измерения с раствором, содержащим только растворённое вещество и растворитель; 2) возможность применения одного и того же метода для определения сольватации как веществ с низким молекулярным весом, так и высокомолекулярных веществ и 3) быстрота и точность измерений.

Несколько иной способ использования акустических методов для изучения процесса сольватации основывается

на измерении переменного электрического потенциала возникающего в растворе электролита при распространении в последнем упругой волны. При распространении ультразвука частицы вещества совершают быстрые колебательные движения. Если вещество состоит из двух родов частиц с сильно различной массой, то более тяжёлые частицы будут отставать в своём движении от более лёгких и в результате этого периодически будет возникать некоторое смещение частиц друг относительно друга. С подобным явлением мы встречаемся при распространении ультразвука в растворах электролитов, у которых анионы и катионы сильно различаются по массе. В этом случае периодически возникает смещение ионов, которое и вызывает возникновение переменного электрического потенциала. Величину возникшего потенциала можно связать с эффективной массой ионов, а отсюда и с их сольватацией. В последние годы возникновение переменных потенциалов в растворах электролитов при распространении ультразвука удалось подтвердить экспериментально.

Скорость ультразвука в жидкостях связана с энергией взаимодействия молекул. Принимая, что внутренняя энергия жидкости в основном сводится к потенциальной энергии взаимодействия молекул $\varphi(r)$ и ограничиваясь при расчёте учётом взаимодействия молекулы только со своими ближайшими соседями, можно в качестве первого приближения получить уравнение

$$a = \sqrt{\frac{\varphi''(r)}{r_0 \rho}},$$

в котором r расстояние между молекулами, ρ — плотность жидкости и $\varphi''(r)$ — вторая производная от потенциальной энергии взаимодействия молекул $\varphi(r)$ по r . Задаваясь видом функции $\varphi(r)$, выражающей изменение потенциальной энергии взаимодействия молекул в зависимости от расстояния между ними, можно, пользуясь приведённым уравнением, рассчитать скорости звука в жидкостях. Ниже, в таблице 5, приведены некоторые из полученных таким способом величин.

Данные, необходимые для расчёта потенциальной энергии взаимодействия молекул, весьма ограничены, и мы можем вычислить скорости звука только для сравнительно небольшого числа жидкостей.

Таблица 4

| Вещество | Скорость звука м/сек. при темпера- туре кипения (вычисленная) | Скорость звука м/сек. при температуре кипения (наблюдаемая) |
|------------------------------------|--|--|
| Ацетон | 1009 | 1032 |
| Сероуглерод | 961 | 1074 |
| Хлороформ | 711 | 860 |
| Четырёххлористый углерод | 616 | 750 |
| Этиловый эфир | 869 | 934 |
| Бензол | 842 | 1030 |
| Этиловый спирт | 1030 | 1000 |
| Вода | 1466 | 1550 |

Несомненный интерес представляет обратная задача: вычисление на основании акустических измерений постоянных, входящих в выражение η (r). Однако решение этой задачи встречает ряд трудностей.

С точки зрения использования акустических методов в практике физико-химических исследований большое значение имеет установленная эмпирически независимость от температуры так называемой молекулярной скорости зву-

R , определяемой соотношением

$$R = a^{1/2} \frac{M}{\rho},$$

в котором M — молекулярный вес, ρ — плотность и a — скорость звука.

Как оказалось, молекулярная скорость звука является для членов одного и того же гомологического ряда аддитивной функцией молекулярного веса. Это позволило приписать атомам отдельных элементов определённые величины, так называемые инкременты молекулярной скорости звука (таблица 6). Пользуясь значениями инкрементов, можно найти величину молекулярной скорости звука в каком-либо веществе, зная его химический состав. Так, например, химический состав вещества, называемого гексаном, выражается формулой C_6H_{14} , и поэтому молекулярная скорость звука должна быть равна $R = 6 \cdot 10 + 14 \cdot 92,5 = 1359$, в то время как опыт даёт величину $R = 1359$, практически с ней совпадающую.

Таблица 5

| Элемент | C | H | O | Cl | Br |
|---|----|------|----|-----|-----|
| Атомный инкремент молекулярной скорости звука | 10 | 92,5 | 74 | 227 | 245 |

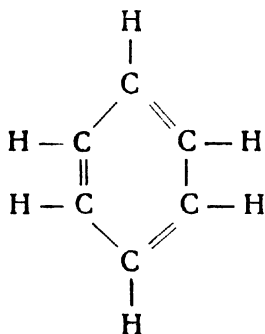
Было установлено также, что молекулярная скорость звука — аддитивна по отношению связей, имеющихсся в данном соединении. В таблице 7 приведены значения инкрементов молекулярной скорости звука, приходящихся на различные связи.

Таблица 6

| Связь | Инкремент молекул. скорости звука | Связь | Инкремент молекул. скорости звука |
|-------|-----------------------------------|-------------|-----------------------------------|
| C—H | 95,2 | P—Cl | 277 |
| C—C | 4,25 | P=O | 85 |
| C—O | 34,5 | C—O (эфиры) | 44,5 |
| O—H | 99,0 | N—H | 90,7 |
| C—Cl | 230—236 | C—N | 20,7 |
| C—C | 129 | C=N | 145 |
| C—O | 186 | C—S | 99,5 |
| Si—Cl | 266 | C—Si | 35,4 |

Зависимость молекулярной скорости звука от характера связей атомов в молекулах даёт возможность пытаться применить акустические измерения для проверки предполагаемого строения сложных молекул.

Использование инкрементов связи можно проиллюстрировать следующим примером: молекуле бензола химики приписывают следующее строение:



Такая структурная формула содержит шесть связей $C-H$, три связи $C-C$ и три связи $C=C$, так что в согласии с сказанным выше молекулярная скорость звука в бензоле должна быть

$$R = 6 \cdot 95,2 + 3 \cdot 4,25 + 3 \cdot 129 = 971.$$

Найденная величина совпадает с определённой опытным путём величиной $R = 977$.

Постоянство молекулярной скорости звука выполняется не только в случае химически индивидуальных жидкостей, но и в случае жидких смесей. Наблюдаемые в некоторых смесях отклонения от этого правила могут объясняться возникновением в них молекулярных соединений.

Для членов одного и того же гомологического ряда молекулярная скорость звука связана линейной зависимостью с другими аддитивными свойствами, например, постоянной b в уравнении Ван дер Ваальса, критическим объёмом и т. д.

Для некоторых веществ (вода, метиловый спирт) молекулярная скорость звука закономерно изменяется с температурой. Эту особенность связывают с изменением

ассоциации соответствующих жидкостей и предлагают вычислять последнюю на основании акустических данных.

При температурах, близких к температуре затвердевания, в некоторых жидкостях наблюдается своеобразная зависимость скорости звука от частоты, исчезающая при повышении температуры. На рисунке 74 изображено изменение скорости звука в пальмитиновой кислоте ($t_{пл.} = 64^\circ C$) при разных температурах в зависимости от частоты. Характер наблюдаемых измене-

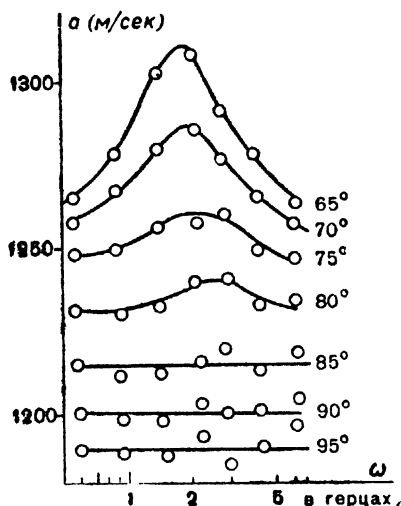


Рис. 74. Дисперсия скорости звука в пальмитиновой кислоте.

ний скорости звука позволяет предположить, что в данном случае мы имеем дело с дисперсией, вызванной резонансными явлениями.

При температуре, близкой к температуре затвердевания, в жидкости возникают как бы зародыши твёрдой фазы области, в которых молекулы расположены упорядоченно, так, как это наблюдается в твёрдом теле. Акустические свойства этих островков упорядоченного расположения молекул отличны от свойств жидкости. Их можно рассматривать как микрорезонаторы, настроенные на определённые частоты. При распространении звука в среде, содержащей подобные резонаторы, должна наблюдаться зависимость скорости звука от частоты. Изучение этой зависимости позволит уточнить наши представления о кристаллизации и молекулярном строении жидкостей вблизи температуры затвердевания.

Если изображать скорость звука как функцию состава жидкой смеси, то в некоторых смесях наблюдается аномальный ход кривой: скорость звука — состав смеси. Так, например, в смеси муравьиная кислота — вода наблюдаются особые точки при молекулярных концентрациях кислоты, равных 1 : 1 и 1 : 2. При тех же концентрациях претерпевают более или менее резкие изменения и другие свойства этой смеси, такие, например, как вязкость, электропроводность, поверхностное натяжение и т. п. Исследование скоростей звука в смесях может пролить свет на те превращения, которые происходят в них, помочь лучше понять их свойства.

В водных растворах многих соединений скорость звука проходит через максимум при определённом составе смеси, а сжимаемость соответственно через минимум. Положение максимума изменяется с изменением температуры, благодаря чему скорость звука в водном растворе этилового спирта, содержащем приблизительно 17% спирта, не зависит от температуры (рис. 75). Можно привести примеры и таких смесей, в которых при определённом составе смеси скорость звука имеет минимальное значение, и, наконец, такие, в которых на кривой, изображающей зависимость скорости звука от состава смеси, имеется точка перегиба.

В физико-химических исследованиях, наряду с измерениями скорости, используются также измерения поглощения звука. Как показывает опыт, поглощение звука

в большинстве жидкостей значительно превосходит теоретически ожидаемое. Причина расхождения, вероятно, коренится в том, что классическая теория учитывает только потери акустической энергии, вызванные обычной

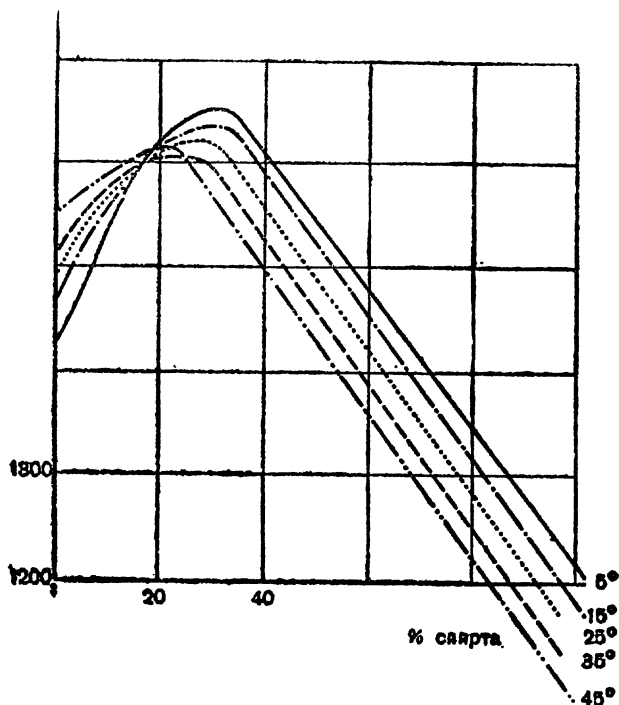


Рис. 75. Изменение скорости звука с температурой в водных растворах этилового спирта различной концентрации.

вязкостью жидкости, проявляющейся при смещении одних слоёв жидкости относительно других. Эту вязкость характеризуют коэффициентом вязкости η , называемым коэффициентом обычной, или сдвиговой, вязкости. Однако вязкость может проявляться не только при течении жидкости, но и при сжатии, т. е. при изменении объёма жидкости. В данном случае вязкость будет характеризоваться коэффициентом объёмной вязкости η' , называе-

мым иногда вторым коэффициентом вязкости¹. Ультразвуковые измерения являются единственным источником наших знаний об объёмной вязкости жидкостей. В частности, коэффициенты объёмной вязкости жидкостей можно вычислить на основании данных о поглощении ультразвука. Оказалось, что во многих случаях коэффициент объёмной вязкости η' значительно превосходит коэффициент сдвиговой вязкости η . Так, например, для воды отношение η'/η составляет приблизительно 2,4, для ацетона 3,1, для хлороформа 24, для CCl_4 28, для бензола 110—150.

Природа процессов, вызывающих появление объёмной вязкости, в различных жидкостях различна. В некоторых случаях появление её вызвано перераспределением энергии между различными степенями свободы движения молекул, таким же, какое вызывает дисперсию скорости ультразвука в многоатомных газах; в других — перегруппировкой молекул между различными структурами, присущими данной жидкости, которая имеет место в ультразвуковой волне, в третьих — химической реакцией и т. д.

Важность этих исследований особенно велика в силу отсутствия удовлетворительной теории жидкого состояния. Мы не располагаем возможностью рассчитывать различные свойства жидкости, не знаем точно механизм многих явлений, протекающих в жидкостях. Ультразвуковые исследования несомненно будут способствовать построению теории жидкого состояния. Изучение поглощения звука является исключительно чувствительным способом исследования структуры и свойств жидкостей.

В подтверждение этого можно указать на своеобразное влияние малых добавок на поглощение звука в жидкостях. На рисунке 76 изображено влияние добавок небольшого количества бензола на поглощение звука в толуоле. Замечательно в данном случае то обстоятельство, что коэффициент поглощения звука в бензоле приблизительно в десять раз больше коэффициента поглощения звука в толуоле, и всё же добавка 0,25% бензола снижает поглощение звука в толуоле на 12—13%. Механизм этого явления пока не выяснен.

¹ Более подробно см. (1; 3).

Большой интерес представляют исследования распространения звука в критической области. На рисунке 77 показано изменение скорости звука с температурой в

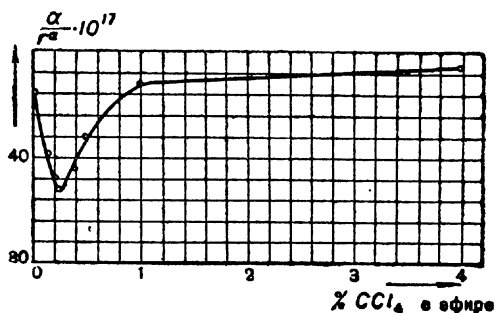


Рис. 76. Влияние малых добавок бензола на поглощение звука в толуоле.

н-гексане, в жидком состоянии, в состоянии насыщенного и перегретого пара, в области температур, включающей критическую. Подобные исследования являются

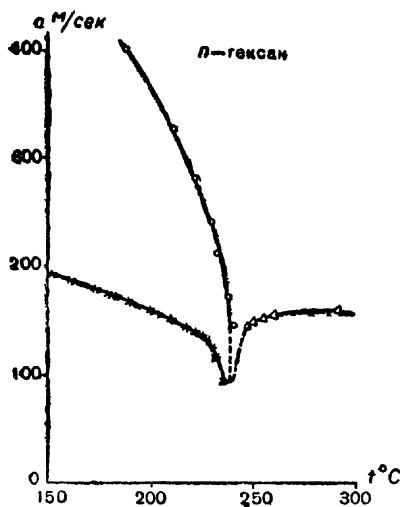


Рис. 77. Зависимость скорости звука в н-гексане от температуры в критической области.

источником ценнейших сведений о поведении и свойствах вещества в критической области, получить которые другими способами не удаётся.

Ультразвуковые методы находят себе широкое применение при исследовании физико-химических свойств твёрдых тел. При этом необходимо помнить, что, в отличие от газов и жидкостей, в твёрдых телах могут распространяться не только продольные, но и поперечные, или, как их называют, сдвиговые волны. Скорости распро-

странения этих волн в одном и том же веществе различны. Скорость распространения продольных волн a_d находится из уравнения

$$a_d = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1 - \sigma}{(1 + \sigma)(1 - 2\sigma)}},$$

в котором E — модуль упругости, называемый обычно модулем Юнга, ρ — плотность среды и σ — постоянная, коэффициент Пуассона. Сдвиговые волны распространяются со скоростью a_s , определяемой соотношением

$$a_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}},$$

в котором μ — модуль сдвига.

Если продольная волна распространяется вдоль длинного тонкого стержня, диаметр которого значительно меньше длины волны, то скорость распространения её a'_d будет отличаться от скорости распространения волны в неограниченной среде; она равна

$$a'_d = \sqrt{\frac{E}{\rho}}.$$

Сдвиговая же волна будет и в этом случае распространяться с прежней скоростью

$$a'_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}.$$

В некоторых случаях приходится учитывать и то обстоятельство, что вдоль поверхности твёрдого тела могут распространяться поверхностные волны, называемые волнами Релея. Смещение частиц в этих волнах очень быстро убывает по мере удаления от поверхности. Скорость волн Релея a_p даётся уравнением

$$a_p = 0,9194 \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}.$$

Если в твёрдом теле одновременно распространяется несколько типов волн, то в результате их взаимодействия может возникать сложное волновое движение, которое трудно проанализировать.

Как легко убедиться, просматривая приведённые выше формулы, акустические измерения в твёрдых телах

естественно использовать для изучения упругих свойств последних. Важность подобного применения ультразвука была одной из причин разработки различных методов измерения скорости звука в твёрдых телах. В прозрачных изотропных твёрдых телах скорость ультразвука можно определить оптическим способом, наблюдая дифракцию света на ультразвуковой решётке. Для исследования непрозрачных тел этот метод не применим. В ряде работ было предложено для определения скорости звука в твёрдом теле исследовать экспериментально изменение интенсивности ультразвуковой волны, прошедшей через пластинку из исследуемого вещества. Плавно изменяя угол падения ультразвукового луча, можно по интенсивности прошедших через пластинку колебаний определить углы полного внутреннего отражения продольной и сдвиговой волн. Обозначая последние δ_1 и δ_2 и скорость звука в жидкости, в которую погружена исследуемая пластинка a_e , находят скорости продольной a_d и сдвиговой a_s волн в пластинке по формулам:

$$a_d = \frac{a_e}{\sin \delta_1} \quad \text{и} \quad a_s = \frac{a_e}{\sin \delta_2}.$$

Скорость продольной волны в твёрдом теле можно вычислить, наблюдая интерференцию звуковых волн, падающих нормально на тонкую пластинку из исследуемого вещества. Изменяя частоту ультразвуковых колебаний и определяя частоты, при которых интенсивность прошедших колебаний максимальна, а также зная толщину пластинки, легко вычислить скорость ультразвука в ней. Интенсивность прошедших колебаний максимальна, если толщина пластинки равна целому числу полуволн. Так как изменять частоту ультразвука обычно бывает затруднительно, то часто предпочитают изменять толщину пластинки, для чего ей придают форму клина, вдоль которого перемещается кристаллический излучатель звука постоянной частоты.

Можно воспользоваться для определения скорости звука в твёрдом теле и обычным ультраакустическим интерферометром. Для этой цели, наполнив измерительную камеру интерферометра какой-либо жидкостью, отмечают точно положения рефлектора, соответствующие максимальному или минимальному значению тока. Затем между излучателем и рефлектором в жидкость погружают

исследуемый образец, вырезанный в форме параллелепипеда и вновь измеряют положения рефлектора, соответствующие максимальным или минимальным значениям тока. Если скорость в образце больше, чем в жидкости, положения последовательных точек максимума и минимума смещаются в направлении отражателя на величину d , определив которую, можно найти искомую скорость звука в образце a по формуле:

$$a = \frac{l}{l-d} a_e,$$

в которой l — толщина образца, a_e — скорость звука в жидкости.

Если положения максимумов смещаются в сторону излучателя, то скорость звука в образце меньше, чем в жидкости, и она находится по формуле:

$$a = \frac{l}{l+d} a_e.$$

При измерении скорости звука в твёрдых телах широкое применение находит себе импульсный метод, в котором измеряется скорость распространения в твёрдом теле сравнительно короткого акустического импульса, а также различные резонансные методы измерения скоростей звука, основанные на определении частот собственных или свободных колебаний тел определённых размеров и формы.

С помощью ультразвуковых измерений были исследованы упругие свойства многих твёрдых тел. Особенно большое количество исследований было проведено с различными пластическими массами и каучуками. Упругие свойства многих из этих веществ зависят от скорости, с которой происходит деформация. В этом случае должна наблюдаться дисперсия скорости звука. Изучению дисперсии скорости звука в различных высокомолекулярных веществах посвящено очень большое количество работ.

Ультразвуковые методы дают возможность изучать упругие свойства твёрдых тел в широком интервале температур. Теплоёмкость бериллия имеет аномальные значения в интервале температур от 10° до 14° по абсолютной шкале. Изучая распространение звука в бериллии, не удалось обнаружить аномалию скорости, хотя

сама по себе скорость звука оказалась чрезвычайно большой — 12 000 м/сек.

Ультразвуковыми методами можно изучать изменение упругих свойств твёрдых тел при нагревании последних до температуры плавления. Совершенно естественно возникает вопрос о том, изменяются ли упругие свойства кристаллического твёрдого тела постепенно по мере нагревания или же при температуре плавления они изменяются скачкообразно. На рисунке 78 изображено изме-

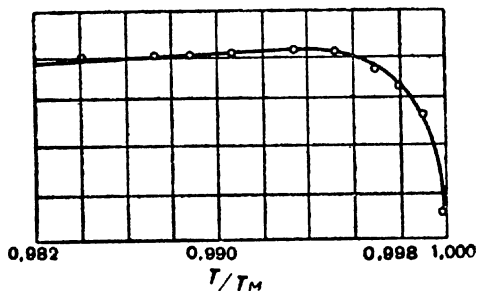


Рис. 78. Зависимость модуля сдвига кристалла NaCl от температуры. Вдоль оси абсцисс отложено отношение температуры опыта к температуре плавления.

ренное ультразвуку-стически изменение модуля сдвига кристалла поваренной соли. Рассматривая график, можно убедиться, что модуль сдвига изменяется по мере роста температуры почти линейно, а затем быстро падает. Однако он сохраняет конечное значение даже при температуре, отстоящей от

точки плавления на доли градуса, так что окончательное падение его до нуля при плавлении кристалла происходит, очевидно, скачкообразно.

Точно так же, пользуясь ультразвуками, удалось измерить теплоёмкость кристалла поваренной соли при различных температурах вплоть до температуры плавления (рис. 79). Согласно закону Дюлонга и Пти, молекулярная теплоёмкость C_v поваренной соли должна быть равна 12 ккал. Взглянув на рисунок 79, мы видим, что эта величина достигается приблизительно при температуре 700°C и сохраняется при плавлении. Это наблюдение убеждает нас в том, что при плавлении кристалла характер движения частиц, из которых состоит кристалл, изменяется незначительно. С помощью ультразвука мы можем следить за теми превращениями, которые происходят в твёрдых телах при изменении температуры давления, намагничивания и т. п. Так, например, измеряя

скорости звука в кристалле Cu_3Au и вычисляя модули упругости, можно обнаружить, что последние претерпевают при определённой температуре скачкообразные изменения (рис. 80). Скачкообразное изменение модулей свидетельствует об исчезновении упорядоченного расположения частиц, характерного для кристалла. Изменяя, как изменяется скорость звука со временем, можно проследить кинетику превращений, происходящих в кристалле.

Приведёнными выше примерами далеко не исчерпываются разнообразные применения ультразвуков в практике физико-химических исследований. В подтверждение можно указать, что недавно ультразвуки применили для выяснения особенностей процесса адсорбции длинных нитеобразных молекул мелкопористым углем. Как известно, в этом случае адсорбция уменьшается с увеличением молекулярного веса. Можно предположить, что в некоторых случаях большие молекулы способны как бы «заклиниваться» в ще-

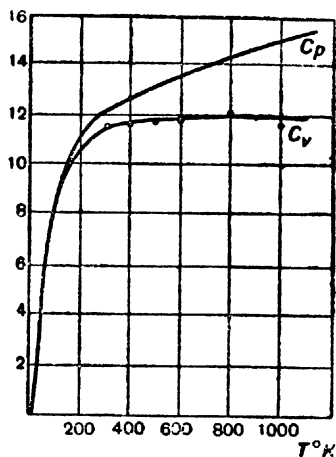


Рис. 79. Зависимость теплоёмкости NaCl от температуры.

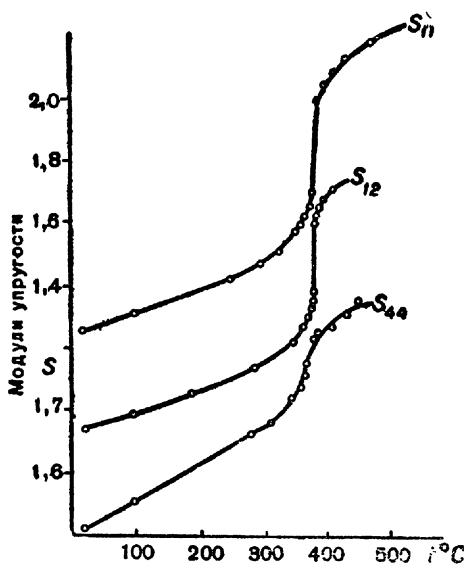


Рис. 80. Зависимость модулей упругости кристалла Cu_3Au от температуры.

лях, выключая тем самым целые участки активной поверхности угля.

В этом случае на адсорбцию должно оказывать большое влияние энергичное встряхивание, вызывающее как бы «утряску» заклинившихся молекул.

Была предпринята попытка воспользоваться для этой цели мощным ультразвуком. Как показали опыты, озвучивание мало влияло на адсорбцию относительно небольших молекул и сильно увеличивало количество адсорбированного вещества у веществ с большим молекулярным весом и цепочкообразными молекулами. Мы рассказали об этом исследовании для того, чтобы ещё раз подчеркнуть те большие возможности, которые открывает в исследовательской работе применение ультразвуков.

Учитывая всё сказанное выше, можно смело рекомендовать включить ультраакустические работы в тематику физических кружков для школьников старших классов. Одновременно очень хотелось бы обратить внимание на эту увлекательную область исследования учителей физики, работающих над повышением своей научной квалификации.

Об ультразвуках и их свойствах можно прочитать в книгах:

1. И. Г. Михайлов, Распространение ультразвуковых волн в жидкостях, Гостехиздат, 1949.

2. В. А. Красильников, Звуковые волны в воздухе, воде и твёрдых телах, Гостехиздат, 1951.

3. Б. Б. Кудрявцев, Применение ультраакустических методов в практике физико-химических исследований, Гостехиздат, 1952.

4. Б. Кэрлин, Ультразвук, Изд. иностр. лит-ры, 1950.

5. Мясников, Акустические измерения, 1937.

6. Розенберг, Ультразвуковые фокусирующие устройства, М., 1948.

7. Мэзон, Пьезоэлектрические кристаллы и их применение в ультраакустике, Изд. иностр. лит-ры, 1952.

8. L. Bergmann, Der Ultraschall, Zürich, 1949.

9. С. И. Кречмер и С. Н. Ржевкин, Труды Физического института Академии наук СССР, т. 1, 1938, стр. 43.

10. Б. Б. Кудрявцев, Неслышимые звуки, изд. «Молодая гвардия», 1953.

1 р. 25 к.
Переплёт 50 к.