

В. В. МАЙЕР

ПРОСТЫЕ ОПЫТЫ С УЛЬТРАЗВУКОМ



Москва «Наука»
Главная редакция
физико-математической литературы
1978

534

М 14

УДК 534

Физика

*Библиотечка
физико-математической школы*

Редактор серии

Я. А. Смородинский

Валерий Вильгельмович Майер

ПРОСТЫЕ ОПЫТЫ С УЛЬТРАЗВУКОМ

(Серия «Библиотечка физико-математической школы»)

М., 1978 г., 160 стр. с илл.

Редактор *Н. А. Райская*

Техн. редактор *Е. В. Морозова*

Корректор *И. Я. Кришталь*

ИБ № 11156

Сдано в набор 17.09.77. Подписано к печати 06.04.78. Т-08208.
Бумага 84×108¹/₃₂, тип. № 1. Литературная гарнитура. Высокая
печать. Условн. печ. л. 8,4. Уч.-изд. л. 7,73. Тираж 140 000 экз.
Заказ № 836. Цена книги 20 коп

Издательство «Наука»

Главная редакция физико-математической литературы
117071, Москва, В-71, Ленинский проспект, 15

Ордена Трудового Красного Знамени Ленинградская типография
№ 2 имени Евгении Соколовой Союзполиграфпрома при Госу-
дарственном комитете Совета Министров СССР по делам изда-
тельств, полиграфии и книжной торговли. 198052, Ленинград,
Л-52, Измайловский проспект, 29

М $\frac{20404-065}{053(02)-78}$ 100-78

© Главная редакция
физико-математической литературы
издательства «Наука», 1978

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	4
I. ПОЛУЧЕНИЕ УЛЬТРАЗВУКА	7
Величины, характеризующие ультразвуковую волну	7
Магнитострикционный эффект и его использование для получения ультразвука	10
Магнитострикционный излучатель низкой частоты	15
Резонансное возбуждение колебаний вибратора	16
Скорость звука в вибраторе	21
Ультразвуковой генератор на транзисторах	23
Подмагничивание вибратора электрическим током	33
Ультразвуковая приставка к школьному усилителю	34
Несколько опытов с магнитострикционным излучателем	36
Ультразвуковой генератор на лампах	43
Магнитострикционный излучатель ультразвука средней частоты	49
Магнитострикционные излучатели ультразвука высокой частоты	52
II. НЕКОТОРЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА УЛЬТРАЗВУКА	68
Волны на бумаге	69
Ориентирующее действие ультразвука	76
Силы, действующие на тела в ультразвуковом поле	79
Ультразвуковой ветер	81
Фигуры Хладни	82
Стоячая ультразвуковая волна в воздухе	88
Стоячая ультразвуковая волна в жидкости	96
Радиационное давление ультразвука	109
Фокусировка ультразвука линзой	114
Ультразвуковой «фонтан наоборот» и другие интересные явления	124
Ультразвуковой капиллярный эффект	130
Ультразвуковая кавитация	133
Дифракция света на ультразвуковой волне	139
Пояснения к заданиям	145
Заключение	159

ПРЕДИСЛОВИЕ

В конце прошлого века о существовании ультразвука могли разве лишь догадываться наиболее проникательные исследователи. Но уже опыты П. Н. Лебедева (1910 г.), а затем и П. Ланжевена (1918 г.) показали большое научное и практическое значение ультразвука. С тех пор ультраакустика развивается удивительно быстрыми темпами, так что многие явления, бывшие всего 20—30 лет назад предметом специальных исследований ученых, в настоящее время широко используются в самых различных областях науки и техники.

Современный школьник просто не может не знать хотя бы простейших свойств ультразвука. И дело здесь не только в той роли, которую ультразвук играет в науке и технике. Гораздо важнее то, что ультразвуковые колебания и волны позволяют достаточно глубоко изучить общие черты всякого колебательного и волнового процесса, а это уже без преувеличений означает в известной степени усвоить дух современной физики.

Ультраакустика интересна еще и тем, что многие эксперименты, которые несколько десятков лет назад ставили ученые, используя сложную научную аппаратуру, в настоящее время можно воспроизвести на простеньких приборах у себя дома или в школьном физическом кабинете. Таким образом, каждый из вас имеет возможность развить в себе элементарные навыки творческой работы физика-экспериментатора. Важность этого не требует особых пояснений. Достаточно отметить, что ни на уроках физики, ни на занятиях разнообразных кружков вы, как пра-

вило, систематически не учитесь физическому эксперименту.

В небольшой книге, которую вы держите в своих руках, описаны простые приборы, обеспечивающие получение ультразвука в диапазоне частот от 20 кГц до 15 МГц, экспериментальные установки и опыты с ними. Приборы и установки настолько просты, что любой из тех, кто умеет обращаться с обычными инструментами и материалами, может изготовить их буквально за считанные дни.

Несколько иначе дело обстоит с опытами. Во-первых, описания части опытов даны в расчете на то, что читатель сможет использовать оборудование, имеющееся в школьном физическом кабинете. Этого требует логика изложения материала, и поэтому не будет большой беды, если такие опыты будут поставлены позднее, после изготовления самодельных приборов.

Во-вторых, — и это существеннее — поставить опыт, вообще говоря, сложнее, чем изготовить какой-либо прибор. Вначале может показаться, что главное — сделать ультразвуковой генератор. Конечно, без генератора невозможно поставить ни один опыт с ультразвуком. Однако успешное изготовление этого прибора является лишь началом работы. Вы очень скоро почувствуете это, перейдя от простейших опытов к тем, которые немного посложнее.

Чтобы несколько облегчить экспериментальную работу, автор стремился изложить условия опытов как можно точнее. Но каждый из вас будет действовать в конкретных ситуациях, все многообразие которых предусмотреть просто невозможно. Поэтому почти наверное можно утверждать, что с первого раза многие из опытов у вас могут и не получиться.

Возможно, это и к лучшему, так как позволит вам остаться один на один с физическим явлением, почувствовать себя экспериментатором, проводящим настоящее исследование. Смелее экспериментируйте! Учитесь преодолевать все трудности на своем пути, и вы познаете ни с чем не сравнимое чувство общения с самой Природой.

Но смелость не значит бездумность. Вряд ли хорош «экспериментатор», без разбору сливающий в

пробирку разные жидкости, чтобы посмотреть, что из этого получится. Может быть, из этого что-нибудь и выйдет, но получится ли из такого «экспериментатора» исследователь, сказать трудно.

Будет очень хорошо, если вы заведете себе тетрадь, в которую самым тщательным образом станете заносить условия и результаты каждого опыта. Это отучит вас от беспорядочного «экспериментирования». Вы почувствуете, как с каждым новым опытом растет ваше знание предмета. Вы сумеете планировать дальнейший эксперимент, предугадывать его результаты, сопоставлять и анализировать опыты. Вы поймете причины многих ваших ошибок и неудач. Одним словом, вы с лихвой окупите то время, которое потратите на записи.

Экспериментальную работу по ультразвуку лучше всего начать с изготовления низкочастотного магнитострикционного излучателя и одного из электронных генераторов для его возбуждения. После этого желательно поставить возможно большее количество опытов с ультразвуком низкой частоты. Когда вы достаточно хорошо освоите низкочастотный диапазон, можно перейти к опытам с ультразвуком средней и высокой частот.

В заключение следует отметить, что внимание автора на возможности магнитострикционных излучателей с ферритовыми вибраторами обратил А. Р. Геннинг. В экспериментальной работе большую помощь оказали бывшие студенты Р.-Э. Е. Шафир, В.-Э. Г. Хохловкин, Ф. Ф. Вавилова, Н. В. Назаров, Е. С. Мамаева и ряд других. Многие учителя физики г. Глазова приложили немало усилий, чтобы вместе со школьниками повторить некоторые из описанных ниже приборов и опытов. Всем им, без чьего труда и доброжелательной поддержки было бы невозможно написание книги, автор выражает глубокую благодарность.

В. В. Майер

Упругие волны — звук — принято делить на инфразвуковые с частотой до 20 Гц, звуковые, частота которых лежит в пределах от 20 Гц до 20 кГц, ультразвуковые с частотой от 20 кГц до 1000 МГц и гиперзвуковые, частота которых превышает 1000 МГц*). Несмотря на то, что слышимый звук и ультразвук — это волны одной природы, для получения ультразвука заметной интенсивности необходимо применять специальные излучатели. Два типа излучателей — пьезоэлектрические и магнитострикционные — пользуются наибольшей популярностью в науке и технике. Поскольку магнитострикционные излучатели значительно более доступны, чем пьезоэлектрические, мы в дальнейшем и рекомендуем изготовление именно этого типа излучателей.

Прежде чем перейти к описанию простых приборов для получения ультразвука, кратко перечислим основные его характеристики.

ВЕЛИЧИНЫ, ХАРАКТЕРИЗУЮЩИЕ УЛЬТРАЗВУКОВУЮ ВОЛНУ

Распространяющуюся в среде гармоническую ультразвуковую волну можно описать уравнением

$$a = A \sin \omega (t - x/c), \quad (1)$$

где a — смещение частиц среды относительно положения равновесия, A — амплитуда смещения,

*) Это деление по частоте в значительной мере условно. Поэтому, говоря об упругой волне частотой, например, 15 кГц, мы иногда ее будем называть звуковой, а иногда ультразвуковой.

$\omega = 2\pi/T = 2\pi f$ — круговая частота (T — период, f — частота волны), t — время, c — скорость волны, x — текущая координата. Величина $\omega(t - x/c)$ называется фазой волны.

Ультразвуковая волна, как и любая другая, периодична в пространстве и во времени. Временной период T и пространственный период λ , который называется длиной волны, связаны между собой очевидным соотношением

$$\lambda = cT = c/f. \quad (2)$$

Частицы среды, в которой распространяется ультразвук, совершают колебательные движения около своих положений равновесия. Колеблются также значения их скоростей и ускорений. Можно поэтому считать, что в области, где существует ультразвуковая волна, одновременно распространяются волны смещений, скоростей и ускорений. Нетрудно показать, что если волна смещений описывается формулой (1), то две последние выражаются формулами

$$u = \omega A \cos \omega(t - x/c), \quad (3)$$

$$b = -\omega^2 A \sin \omega(t - x/c), \quad (4)$$

где $U = \omega A$ и $B = \omega^2 A$ — соответственно амплитуды скорости и ускорения. Следует отдавать себе отчет в том, что реально в среде распространяется одна упругая волна; формулы (1), (3) и (4) описывают один и тот же физический процесс с разных точек зрения.

Участок среды объемом V и массой m , в которой распространяется волна, обладает потенциальной энергией

$$W_{\text{п}} = \frac{kV}{2} \frac{\omega^2 A^2}{c^2} \cos^2 \omega \left(t - \frac{x}{c} \right), \quad (5)$$

где k — модуль упругости (Юнга), и кинетической энергией

$$W_{\text{к}} = \frac{\rho V}{2} \omega^2 A^2 \cos^2 \omega \left(t - \frac{x}{c} \right), \quad (6)$$

где $\rho = m/V$ — плотность среды. Из этих формул видно, что потенциальная и кинетическая энергии

бегущей волны изменяются в одной фазе. Полная энергия участка волны

$$W = W_p + W_k = \frac{V}{2} \left(\frac{k}{c^2} + \rho \right) \omega^2 A^2 \cos^2 \omega \left(t - \frac{x}{c} \right) \quad (7)$$

есть величина переменная, зависящая от t и x . При распространении волны энергия переходит из одних участков среды в другие.

Очевидно, в упругой волне максимальные значения потенциальной и кинетической энергии должны быть равны между собой (этого требует закон сохранения энергии). Учитывая это, из формул (5) и (6) находим $k/c^2 = \rho$; отсюда скорость упругой волны равна

$$c = \sqrt{k/\rho}. \quad (8)$$

Подставляя полученное значение скорости в формулу (7), будем иметь

$$W = V \rho \omega^2 A^2 \cos^2 \omega \left(t - x/c \right). \quad (9)$$

Акустическая энергия, заключенная в единице объема среды, через которую проходит ультразвук, называется плотностью энергии. Плотность энергии $W/V = \rho \omega^2 A^2 \cos^2 \omega \left(t - x/c \right)$ есть величина переменная. Поэтому ультразвуковую волну часто характеризуют средней по времени плотностью энергии. Среднее значение квадрата косинуса равно $1/2$, следовательно, средняя плотность энергии равна

$$E = 1/2 \rho \omega^2 A^2 = 2\pi^2 \rho A^2 f^2 = 1/2 \rho U^2. \quad (10)$$

Интенсивность, или сила, ультразвука определяется как количество энергии, переносимой волной за единицу времени через единицу поверхности, перпендикулярной к направлению распространения ультразвука. Из приведенных определений следует, что интенсивность I тесно связана со средней плотностью энергии:

$$I = cE = 2\pi^2 A^2 f^2 \rho c = 1/2 U^2 \rho c. \quad (11)$$

Чаще всего интенсивность ультразвука измеряется в Вт/см².

Произведение ρc , входящее в формулу (11), получило название акустического сопротивления среды.

При распространении ультразвуковой волны в среде возникают области сжатия и разрежения. Появляющееся при этом переменное давление называется звуковым. Нетрудно показать, что звуковое давление

$$p = p_0 + A p \cos \omega(t - x/c), \quad (12)$$

где p_0 — давление в среде в отсутствие волны, $A p = A p \cos \omega$ — амплитуда переменного звукового давления. Обращаясь к формулам (11) и (12), замечаем, что амплитуда звукового давления связана с интенсивностью соотношением

$$I = \frac{p^2}{2\rho c}, \quad (13)$$

которое показывает, что интенсивность ультразвука прямо пропорциональна квадрату амплитуды звукового давления и обратно пропорциональна акустическому сопротивлению среды. Из формул (3) и (12) следует также, что отношение амплитуд звукового давления и колебательной скорости равно акустическому сопротивлению среды:

$$P/U = \rho c. \quad (14)$$

С другими величинами, характеризующими ультразвук, мы будем знакомиться по мере возникающей в этом необходимости.

Формулы (3)—(6) и (12) даны без вывода. Конечно, можно было бы привести элементарный вывод этих формул. Однако он громоздок и вряд ли достаточно убедительно разъяснит существо дела. Рано или поздно вы познакомитесь с основными идеями и техникой дифференциального и интегрального исчисления. Тогда выводы подобных формул будут вам представляться очевидными.

МАГНИТОСТРИКЦИОННЫЙ ЭФФЕКТ И ЕГО ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ УЛЬТРАЗВУКА

Проделайте следующий опыт. На ферритовый стержень диаметром 8 мм и длиной 50—160 мм плотно (можно внавал) намотайте обмотку, содержащую 200—300 витков провода ПЭЛ 0,2. Выводы обмотки подключите к входу М школьного усилителя низкой

частоты типа УНЧ-3, а к выходу усилителя Гр подсоедините лампочку накаливания, рассчитанную на напряжение 2,5 В и ток 0,15 А. Держась за один конец ферритового стержня рукой, по другому слегка ударьте каким-либо предметом из немагнитного материала. При этом, если вы правильно подобрали чувствительность усилителя, лампочка немедленно вспыхнет (рис. 1).

Проанализируем опыт. Поскольку вспыхнула лампочка, значит, на выходе усилителя возникает ток, который может быть обусловлен лишь кратковременным появлением напряжения на его входе. Разность потенциалов на концах обмотки стержня могла возникнуть только за счет прохождения по обмотке тока. Но ток в обмотке может появиться лишь тогда, когда изменяется магнитное поле, пронизывающее ее витки. Следовательно, при ударе о ферритовый стержень на короткий промежуток времени изменилось пронизывающее обмотку магнитное поле, и, поскольку сам стержень был немагнитен, нужно заключить, что при ударе вокруг стержня возникало магнитное поле.

Явление, которое вы наблюдали на опыте, — явление магнитного поля при деформации ферромагнетика — называется обратным магнитострикционным эффектом. Прямой магнитострикционный эффект — изменение размеров (деформация) ферромагнетика при изменении окружающего магнитного поля — был впервые обнаружен английским ученым Джоулем еще в 1847 году.

Зависимость линейной деформации некоторых материалов от напряженности магнитного поля графически показана на рис. 2. Из графиков видно, что наиболее сильно и самым простым образом магнитострикционный эффект проявляется у никеля. Более сложна зависимость деформации от напряженности магнитного поля у железа и литого кобальта.

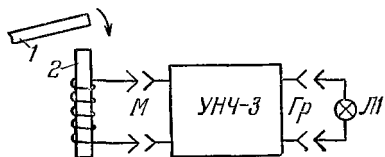


Рис 1. К наблюдению обратного магнитострикционного эффекта

1—деревянная палочка, которой производится удар, 2—ферритовый стержень с обмоткой.

Железный стержень, например, в слабом магнитном поле удлиняется (положительная магнитострикция), а в сильном — укорачивается (отрицательная магнитострикция).

Прямой магнитострикционный эффект широко используется для получения ультразвука: если по обмотке возбуждения, вдоль оси которой расположен ферромагнитный стержень, пропускать переменный ток достаточно высокой частоты, то стержень будет периодически изменять свои размеры и его колеблющиеся концы смогут возбудить в окружающей среде упругую ультразвуковую волну (рис. 3).

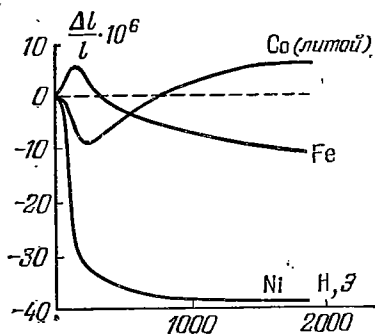


Рис. 2. Графики зависимости деформации стержней из никеля, железа и литого кобальта от напряженности магнитного поля, направленного по оси этих стержней.

Обратный магнитострикционный эффект применяют в приемниках ультразвука, которые устроены точно так же, как излучатели. Собственно, для постановки описанного выше опыта вы уже использовали простейшую модель магнитострикционного приемника.

Существенной особенностью магнитострикционного эффекта является, как принято говорить, его четность, т. е. независимость эффекта от направления магнитного поля. Если помещенный в продольное магнитное поле никелевый стержень становится короче, чем в отсутствие поля, то при изменении направления магнитного поля на противоположное стержень так и остается укороченным, а не удлиняется. Поэтому концы ферромагнитного стержня, расположенного в обмотке возбуждения, по которой проходит переменный ток (см. рис. 3), колеблются с частотой, в два раза превышающей частоту переменного тока. Чтобы подробнее рассмотреть эту особенность, обратимся к рис. 4,

Никелевый стержень длиной l_0 , внесенный в постоянное магнитное поле напряженностью H_0 , короче, чем в отсутствие поля на величину Δl_0 (см. рис. 4, а). Поместим никелевый стержень в переменное магнитное поле, напряженность которого H меняется по синусоидальному закону. В этом случае стержень будет укорачиваться всякий раз, когда напряженность магнитного поля — независимо от его направления — станет отлична от нуля (см. рис. 4, б). Таким образом, размеры стержня будут колебаться с удвоенной частотой по сравнению с частотой переменного магнитного поля.

Чтобы избежать этого часто нежелательного явления, на переменное магнитное поле H дополнительно накладывают постоянное, напряженность которого H_0 имеет вполне определенную величину. В этом случае под действием постоянного поля никелевый стержень все время короче, чем в своем естественном состоянии, а наличие переменного поля приводит к тому, что стержень станет изменять свои размеры синфазно с изменением этого поля: при увеличении напряженности магнитного поля стержень будет укорачиваться, а при уменьшении — удлиняться (см. рис. 4, в). При этом частота колебаний стержня будет совпадать с частотой вызывающего эти колебания переменного магнитного поля, а амплитуда колебаний возрастет практически вдвое.

Наложение на переменное магнитное поле постоянного называется подмагничиванием или поляризацией стержня, а сам стержень, совершающий ультразвуковые колебания, принято называть вибратором.

Вибраторы промышленных магнитострикционных излучателей, как правило, изготавливаются из никеля или специальных ферромагнитных сплавов. Сравни-

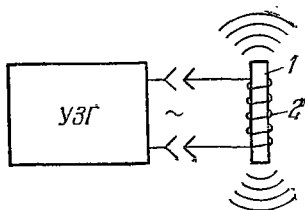


Рис. 3. Возбуждение ультразвуковых колебаний магнитострикционного стержня.

Ферромагнитный стержень 1 окружен обмоткой возбуждения 2, по которой проходит переменный ток от электронного генератора электрических колебаний ультразвуковой частоты (УЗГ — ультразвуковой генератор).

Только недавно для вибраторов магнитоэластичных излучателей стал использоваться и феррит — ферромагнитный материал, сильно напоминающий по своим свойствам и способу получения керамику. Феррит обладает значительной магнитоэластикой, близкой к магнитоэластике никеля, и вместе с тем высоким удельным сопротивлением. Последнее свойство обеспечивает существенное преимущество ферритовых

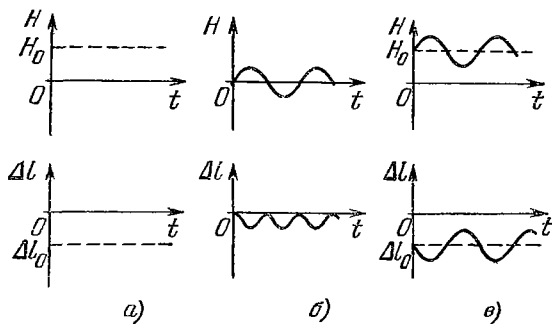


Рис 4. Графики, поясняющие физическую сущность поляризации магнитоэластичного вибратора.

a — стержень в постоянном магнитном поле; *б* — стержень в переменном магнитном поле; *в* — стержень в переменном поле дополнительно поляризован постоянным магнитным полем.

вибраторов перед никелевыми: на относительно низких ультразвуковых частотах потери в ферритовом вибраторе на вихревые токи незначительны, что позволяет изготавливать из феррита монолитные вибраторы практически любой необходимой формы. Никелевые вибраторы для уменьшения потерь на вихревые токи обычно набирают — как и сердечники трансформаторов — в виде пакетов, состоящих из изолированных друг от друга тонких пластинок.

Основным недостатком феррита является его малая механическая прочность: ферритовые вибраторы при достижении интенсивности ультразвука порядка 2—4 Вт/см², как правило, терпят излом. К счастью, ультразвук меньшей интенсивности все же позволяет поставить большую серию учебных опытов.

Задание 1. Поставьте опыт по обнаружению обратного магнитострикционного эффекта, пользуясь подходящим усилителем низкой частоты бытовой радиоаппаратуры.

МАГНИТОСТРИКЦИОННЫЙ ИЗЛУЧАТЕЛЬ НИЗКОЙ ЧАСТОТЫ

Конструкция магнитострикционного излучателя и его внешний вид изображены на рис. 5, а, б. В качестве вибратора излучателя использован круглый ферритовый стержень марки М40ОНН диаметром 8 мм и длиной 100—160 мм. В каркасе обмотки возбуждения вибратор мягко закреплен с помощью резинового колечка, расположенного по его середине. Кар-

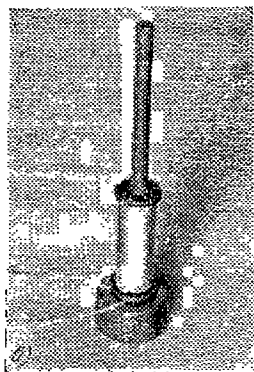
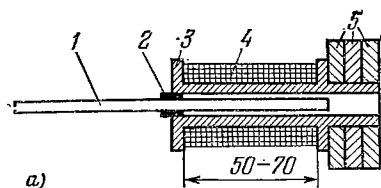


Рис. 5. Конструкция магнитострикционного излучателя для получения ультразвука низкой частоты (20—50 кГц) (а) и его внешний вид (б).

1—ферритовый вибратор, 2—резиновое колечко, 3—каркас обмотки возбуждения, 4—обмотка возбуждения, 5—кольцевые керамические магниты

кас обмотки возбуждения можно выточить на токарном станке из подходящего материала (оргстекла, эбонита, текстолита, дерева и т. п.) или склеить из нескольких слоев бумаги. Обмотка возбуждения должна содержать два слоя провода ПЭЛ 1, 0, намотанных виток к витку на длину, равную примерно половине длины вибратора. Выводы обмотки возбуждения нужно выполнить из многожильных проводников в полихлорвиниловой изоляции длиной 30—50 см, снабженных наконечниками для зажима под клеммы или штеккерами для включения в гнезда. Обмотку возбуждения следует покрыть слоем лакоткани, высоко-

вольтной изоленты или несколькими слоями бумаги. Впрочем, лучше намотать всю обмотку проводником в полихлорвиниловой изоляции, которая в этом случае не должна быть слишком толстой. Для подмагничивания вибратора можно использовать два-три кольцевых керамических магнита диаметром 35 мм и толщиной 7 мм из школьного набора. Магниты следует надеть на выступающую часть обмотки возбуждения так, чтобы нерабочий торец вибратора находился в одной плоскости с поверхностью ближайшего к нему магнита.

РЕЗОНАНСНОЕ ВОЗБУЖДЕНИЕ КОЛЕБАНИЙ ВИБРАТОРА

Расположив изготовленный вами магнитострикционный излучатель вертикально на столе, подключите его обмотку возбуждения к клеммам Общ и 600 Ом школьного звукового генератора типа ГЗШ-63. Включив генератор и установив частоту переменного напряжения в диапазоне 2—20 кГц, вы услышите слабый звук.

В этом простеньком опыте вы впервые наблюдали проявление прямого магнитострикционного эффекта: под действием переменного магнитного поля вибратор излучателя периодически изменяет свою длину и возбуждает в воздухе звуковую волну. Малая интенсивность излучаемого в опыте звука объясняется тем, что магнитострикционный эффект очень невелик — относительное изменение длины вибратора $\Delta l/l$ не превышает 10^{-5} — 10^{-4} (см. рис. 2) — поэтому мала и амплитуда колебаний вибратора. Для увеличения амплитуды колебаний в магнитострикционных излучателях используют явление резонанса.

Пусть один из концов свободного (незакрепленного) стержня длиной l (рис. 6, а) под действием вынуждающей силы совершает колебания по гармоническому закону

$$a_1 = A \sin \omega t, \quad (15)$$

где a_1 — смещение торца, A — амплитуда колебания, $\omega = 2\pi f$ — круговая частота и t — время. Тогда по стержню побежит упругая синусоидальная волна, ко-

торая, дойдя до второго конца стержня, отразится без изменения фазы и вернется к первому. Если пренебречь потерями, то первый конец стержня под

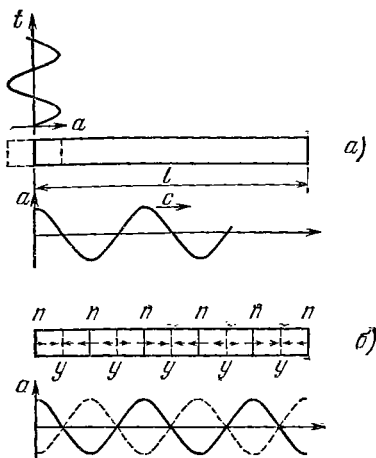


Рис. 6. Резонансное возбуждение колебаний вибратора.

a Левый конец стержня колеблется по гармоническому закону (график изображен над этим концом); при этом вдоль стержня (вдоль оси x) со скоростью c распространяется упругая волна («моментальная фотография» распределения смещений изображена под стержнем). *б*. В результате интерференции волны, падающей на правый конец стержня, и волны, отраженной от него, устанавливается стоячая волна, узлы и пучности которой обозначены соответственно буквами y и n . Стрелками показаны направления колебаний в различных участках стержня вдоль оси x для того момента времени, для которого сплошной линией построен график под стержнем.

действием отраженной волны будет участвовать в колебательном движении

$$a_2 = A \sin \omega (t - 2l/c), \quad (16)$$

где c — скорость звуковой волны в стержне. Результирующее колебание этого конца стержня, происходящее под действием вынуждающей силы и силы, развиваемой отраженной волной, описывается формулой

$$a = a_1 + a_2 = 2A \cos(\omega l/c) \sin \omega (t - l/c). \quad (17)$$

Таким образом, конец стержня совершает гармоническое колебание с амплитудой $2A \cos(\omega l/c)$. Резонанс наступает при таких частотах ω , при которых

амплитуда вынужденных колебаний максимальна, т. е. при выполнении условий

$$\cos\left(\frac{\omega l}{c}\right) = 1 \quad \text{или} \quad \frac{\omega l}{c} = k\pi, \quad \text{где} \quad k = 0, 1, 2, \dots$$

Выражая ω через f , из последней формулы получаем

$$f = \frac{kc}{2l}, \quad k = 0, 1, 2, \dots \quad (18)$$

Частоты, определяемые этой формулой, называются собственными частотами свободного стержня. При $k = 0$ собственная частота стержня равна нулю (стержень покоится). Собственная частота при $k = 1$

$$f = \frac{c}{2l}$$

называется основной собственной частотой. Остальные собственные частоты принято называть гармониками соответствующего порядка. Если говорят, что вибратор возбуждается на третьей гармонике, то под этим подразумевается, что он колеблется с частотой $f = 3c/2l$.

Что же происходит в стержне, когда он возбуждается на одной из собственных частот? Пользуясь соотношением (2), из формулы (18) получаем

$$l = \frac{1}{2}k\lambda, \quad k = 1, 2, \dots \quad (19)$$

Следовательно, при возбуждении стержня на k -й гармонике вдоль его длины укладывается k длин полуволн звука, т. е. в стержне устанавливается стоячая звуковая волна, получающаяся в результате интерференции падающей на второй конец стержня и отраженной от него волн (рис. 6, б).

Если стержень возбуждается на основной собственной частоте, то на нем укладывается половина длины волны звука, так что в середине стержня образуется узел смещений стоячей волны. Именно это позволило закрепить вибратор в каркасе обмотки возбуждения за его середину (см. рис. 5). Крепление вибратора сделано мягким потому, что при жестком креплении меньше потери энергии, и при резонансе амплитуда колебаний настолько возрастает, что ферритовый вибратор сразу терпит излом.

Со стоячей ультразвуковой волной мы еще будем иметь возможность познакомиться подробнее, а сейчас необходимо приступить к настоящей проверке магнестрикционного излучателя.

Подключите, как описано выше, излучатель к генератору типа ГЗШ-63. На верхний торец ферритового вибратора положите лезвие безопасной бритвы (рис. 7). Включите генератор и, дав ему прогреться, постепенно увеличивайте частоту переменного тока, проходящего по обмотке возбуждения. Вы услышите,

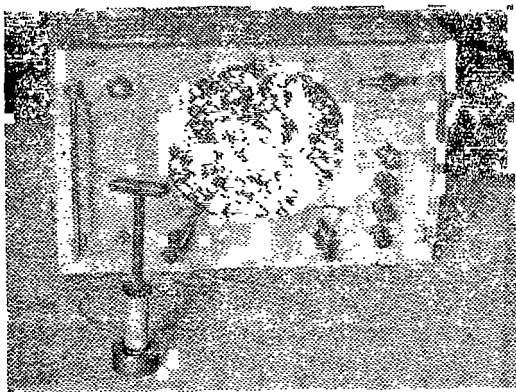


Рис. 7. Опыт, иллюстрирующий резонансное возбуждение колебаний магнестрикционного вибратора.

Лезвие на торце вибратора служит индикатором ультразвуковых колебаний

как повышается тон слабого звука, издаваемого излучателем. Начиная с частоты около 15 кГц, вы почти перестанете воспринимать этот звук. Однако, как только вы достигнете частоты порядка 19 кГц (если опыт проводится с излучателем, вибратор которого имеет длину 140 мм), вы услышите резкий дребезжащий звук, издаваемый лежащим на вибраторе лезвием.

Попробуем объяснить наблюдаемое явление. За счет чего появляется дребезжание лезвия? По-видимому, если вибратор колеблется, а лежащее на нем лезвие не успевает совершать колебания вместе с вибратором, то торец вибратора будет то ударять по лезвию, то уходить от него, и тогда возникает

дребезжащий звук. Но почему нет этого звука при частотах, отличных от 19 кГц? Видимо, следует предположить, что амплитуда колебаний вибратора на всех других испытанных вами частотах много меньше, чем на частоте 19 кГц, и лезвие успевает совершать колебания вместе с вибратором.

Проверьте правильность этих рассуждений. Уберите с вибратора лезвие и вновь медленно подводите частоту к тому ее значению, при котором ранее появлялся дребезжащий звук. Как только вы достигнете его, вы почувствуете давление на барабанные перепонки, а звука по-прежнему слышать почти не будете. Это вновь говорит о том, что при найденной частоте вибратор излучателя колеблется со значительной амплитудой, возбуждая в воздухе почти неслышимую ухом, но воспринимаемую им ультразвуковую волну.

Итак, из выполненного опыта следует, что, во-первых, для получения с помощью данного магнитострикционного излучателя ультразвука максимальной интенсивности следует возбуждать вибратор на одной из собственных частот и, во-вторых, изготовленный вами излучатель работает так, как нужно.

Найденная в опыте частота 19 кГц является основной собственной частотой вибратора длиной 140 мм. В этом нетрудно убедиться, если попробовать добиться резонанса на более низкой частоте. Теория показывает, что амплитуда колебаний вибратора, возбужденного на основной частоте, больше амплитуды колебаний на любой из гармоник. Поэтому во всех описанных ниже опытах вибратор излучателя совершает колебания именно на основной собственной частоте.

Задание 2. Ультразвуковые колебания магнитострикционного вибратора, возбуждаемого на основной собственной частоте, неслышимы, и это может в какой-то степени препятствовать уяснению сути разбираемых здесь явлений. Поэтому попробуйте поставить опыты, аналогичные описанным, в звуковом диапазоне частот.

Левой рукой возьмите за середину стеклянную трубку диаметром около 6 мм и длиной примерно

60 см. Зажатой в правой руке полотняной тряпочкой, смоченной спиртом или одеколоном, плавно без особого нажима проведите по трубке от ее конца к середине. При этом вы услышите довольно сильный чистый звук.

Выясните, появляется ли звук, если возбуждаемую трением трубку держать не за середину. Определите на слух, как зависит частота звука от длины трубки.

Задание 3. Закрепите вибратор магнитострикционного излучателя не за середину, а вблизи одного из его концов. Как при этом изменяется амплитуда колебаний вибратора? Повторите опыт с одним из описанных ниже самодельных ультразвуковых генераторов.

СКОРОСТЬ ЗВУКА В ВИБРАТОРЕ

Бегущая синусоидальная волна представляет собой распространяющиеся с постоянной скоростью области сжатий и разрежений среды. Если волна в среде распространяется без изменения своей формы, то, очевидно, с той же скоростью в среде будет распространяться мгновенный импульс сжатия или разрежения. Таким образом, вместо того, чтобы искать скорость распространения звуковой волны (это несложно, но требует знания специальных разделов высшей математики), достаточно найти скорость движения в среде короткого импульса сжатия или разрежения.

Пусть по торцу бесконечно длинного упругого стержня производится удар так, что сила F действует в течение малого промежутка времени Δt . За время Δt торец сместится на расстояние Δl (рис. 8), в результате чего окажется деформированным кусок стержня длиной l . Скорость перемещения деформации по стержню

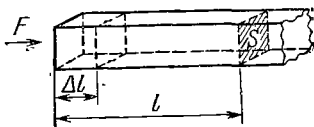


Рис. 8. К выводу формулы для скорости звука в упругом стержне.

$$c = l/\Delta t. \quad (20)$$

Очевидно, это и есть искомая скорость распространения упругой — звуковой — волны в стержне.

К концу времени Δt все частицы отрезка стержня длиной l приобретут под действием импульса силы $F\Delta t$ одинаковую скорость $u = \Delta l/\Delta t$. Это нетрудно представить себе, если вспомнить, что происходит при толчке паровоза о состав: импульс сжатия с большой скоростью бежит вдоль состава (о его скорости можно судить по последовательному лязгу буферов вагонов), и те вагоны, до которых дошел импульс, приобретают небольшую скорость в направлении толчка. Согласно законам динамики импульс силы равен изменению количества движения

$$F \Delta t = mu, \quad (21)$$

где m — масса отрезка стержня длиной l . Если сечение стержня и его плотность равны соответственно S и ρ , то

$$m = \rho Sl. \quad (22)$$

По закону Гука деформирующая сила F численно равна силе упругости

$$F = kS \Delta l/l, \quad (23)$$

где k — модуль упругости (Юнга). Подставляя значения m и F из выражений (22) и (23) в формулу (21), получим

$$kS \frac{\Delta l}{l} \Delta t = \rho S l u.$$

Пользуясь тем, что $c = l/\Delta t$ и $u = \Delta l/\Delta t$, из последней формулы для скорости звука имеем

$$c = \sqrt{k/\rho}. \quad (24)$$

Итак, скорость звука в упругом стержне пропорциональна корню квадратному из модуля упругости, деленного на плотность среды. Раньше эта формула была дана без вывода (см. (8)).

Отсюда следует, что путем измерения скорости звука можно определять упругие характеристики вещества.

Чтобы понять, как это делается, вычислим модуль упругости ферритового стержня. Из опыта вы нашли,

что основная собственная частота ферритового вибратора длиной 140 мм равна 19 кГц. Следовательно, по формуле (18) скорость звука в феррите

$$c_{\text{ф}} = 2lf = 2 \cdot 14 \cdot 19 \cdot 10^3 = 5,32 \cdot 10^5 \text{ см/с.}$$

Плотность феррита примерно равна 4,7 г/см³. Отсюда модуль упругости для феррита

$$k = \rho c^2 = 13,3 \cdot 10^{10} \text{ дин/см}^2.$$

Зная модуль упругости и плотность, можно решить обратную задачу определения скорости звука в стержне. А по известным скорости звука и длине вибратора можно определить частоту ультразвуковой волны. Таким образом, вы располагаете одним из способов градуировки самодельного ультразвукового генератора по частоте.

Задание 4. Из листа никеля толщиной 0,1—0,2 мм вырежьте полоску шириной около 1 см и длиной 12—17 см. Вырезать полоску следует либо под углом 45°, либо в направлении проката никелевого листа. Полоску изогните вдоль ее длины и вставьте внутрь каркаса обмотки возбуждения магнитоэлектрического излучателя. Пользуясь школьным звуковым генератором типа ГЗШ-63, определите модуль упругости и скорость распространения звука в никеле (плотность никеля $\rho = 8,8 \text{ г/см}^3$).

УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ГЕНЕРАТОР НА ТРАНЗИСТОРАХ

Школьный звуковой генератор типа ГЗШ-63 можно использовать лишь для постановки самых простых опытов с ультразвуком низкой частоты. Поэтому ниже дано описание простого и надежного транзисторного ультразвукового генератора.

Принципиальная схема генератора изображена на рис. 9. Прибор собран на низкочастотных транзисторах и состоит из двух каскадов: задающего генератора на маломощном транзисторе Т1 и усилителя, собранного на транзисторе Т2.

Задающий каскад представляет собой автогенератор с индуктивной обратной связью. Частота

генератора определяется параметрами колебательного контура, состоящего из катушки индуктивности $L1$ (первичной обмотки высокочастотного трансформатора $Tr2$) и конденсатора $C2$. Плавная настройка генератора на нужную частоту осуществляется перемещением внутри обмоток трансформатора ферритового сердечника (изменением индуктивности контурной

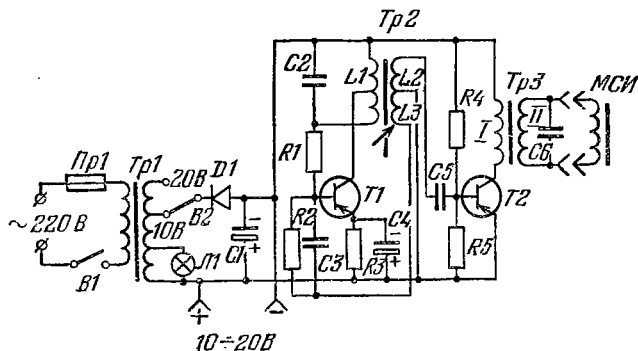


Рис. 9. Принципиальная схема ультразвукового генератора низкой частоты на транзисторах.

Радиодетали: диод $D1$ типа Д247, транзистор $T1$ типа МП41 (МП42), транзистор $T2$ типа П4 (П210); конденсаторы: $C1$ (500 мкФ×30 В), $C2$ (0,04 мкФ), $C3=C5=C6$ (0,1 мкФ), $C4$ (5 мкФ×20 В); резисторы: $R1$ (5,1 кОм), $R2=R4$ (2,7 кОм), $R3$ (64 Ом), $R5$ (270 Ом).

катушки). Обмотка $L3$ трансформатора является катушкой обратной связи, с которой переменное напряжение через ячейку $R2$, $C3$ подается на базу транзистора $T1$. Для самовозбуждения генератора необходимо, чтобы обратная связь была положительной.

Режим работы транзисторов задается отрицательным автоматическим смещением на их базах, которое осуществляется делителями напряжения $R1$, $R2$ и $R4$, $R5$. Температурная стабилизация транзистора $T1$ осуществляется ячейкой $R3$, $C4$.

Напряжение высокой частоты, вырабатываемое автогенератором, посредством катушки $L2$ и конденсатора $C5$ подается на базу транзистора $T2$. Нагрузкой этого транзистора служит первичная обмотка выходного трансформатора $Tr3$. Конденсатор $C6$ предназначен для оптимального согласования магни-

тострикционного излучателя МСИ с выходом генератора.

Генератор питается от выпрямителя, состоящего из силового трансформатора $Tr1$, диода $D1$ и электролитического конденсатора $C1$. Переключатель $B2$ служит для подачи на генератор напряжений 10 и 20 В. Эти напряжения также выведены к специальным гнездам, которые используются при осуществлении подмагничивания вибратора постоянным током. Силовой трансформатор через предохранитель $Pr1$, рассчитанный на ток 0,5 А, включается в осветительную сеть напряжением 220 или 127 В. Включателем $B1$ подается напряжение на генератор, при этом загорается сигнальная лампочка $Л1$.

Самодельные детали. Основными самодельными деталями генератора являются трансформаторы. Высокочастотный трансформатор $Tr2$ намотан на круглом каркасе, изготовленном из подходящего изоляционного материала по чертежу, представленному на рис. 10, а. Отверстия в одной из щек каркаса, в которых нарезана резьба под болты $M4$, предназначены для крепления трансформатора на шасси генератора. Первичная обмотка $L1$ трансформатора содержит две одинаковые секции по 100 витков в каждой; обмотки $L2$ и $L3$ содержат 36 и 25 витков соответственно. Все обмотки намотаны в одну сторону проводом ПЭЛ 0,51 и должны быть надежно изолированы тонкой бумагой друг от друга.

Выходной трансформатор $Tr3$ можно намотать на Ш-образном сердечнике сечением 2—3 см² или, еще лучше, на ферритовом стерженьке диаметром 8 мм и длиной 40 мм (см. рис. 10, б). Первичная I и вторичная II обмотки трансформатора содержат по 100 витков провода ПЭЛ 0,51. Между обмотками необходимо проложить изолирующую бумажную прокладку.

Трансформатор $Tr1$ проще всего изготовить из фабричного силового трансформатора к ламповому приемнику. Схема трансформатора типа ТС-4, который лучше всего подходит для этой цели, представлена на рис. 11. Сопоставляя ее со схемой, изображенной на рис. 9, вы заметите, что у фабричного трансформатора нужно удалить накальную и

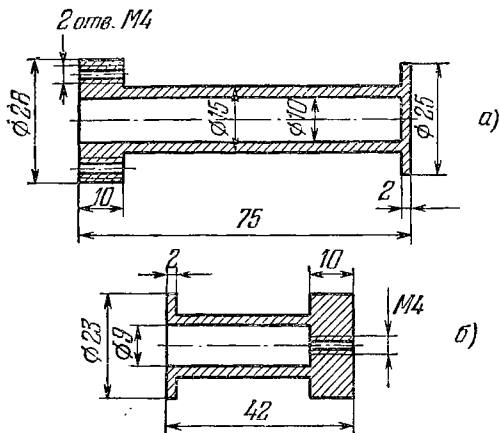
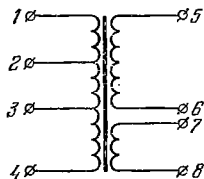


Рис. 10. Чертежи каркасов высокочастотного (а) и выходного (б) трансформаторов.



Обмотки	Выходы	Провод		Число витков	Напряжение при номинальной нагрузке, В
		марка	ϕ мм		
Сетевая	1-2	ПЭЛ	0,41	590	220(127)110
	1-3	ПЭЛ	0,41	670	
	1-4	ПЭЛ	0,41	1175	
Анодная	5-6	ПЭЛ	0,20	1380	235 ± 5
Накальная	7-8	ПЭЛ	1,0	36	$6,3 \pm 0,3$

Рис. 11 Принципиальная схема и паспортные данные силового трансформатора типа ТС-4.

повышающую обмотки, а вместо них намотать понижающую обмотку, которая обеспечила бы получение напряжений 10 и 20 В (а также 6,3 В для питания сигнальной лампочки).

Рассчитаем число витков этой обмотки. Поскольку с 36 витков накальной обмотки снимается напряжение 6,3 В, то для получения напряжения 10 В необходимо иметь обмотку, содержащую

$$N = \frac{36 \text{ витков} \cdot 10 \text{ В}}{6,3 \text{ В}} \approx 57 \text{ витков.}$$

Таким образом, если вы наматаете обмотку, содержащую 114 витков, и сделаете отвод от ее середины, то сможете получить от вашего трансформатора переменные напряжения 10 и 20 В.

Переменный ток от трансформатора далее выпрямляется и фильтруется, так что на выходе выпрямителя получаются напряжения, несколько большие 10 и 20 В. Поэтому понижающую обмотку трансформатора можно уменьшить, намотав вместо 114 витков только 100. Тогда отвод придется делать от 50-го витка (если вы хотите снабдить генератор сигнальной лампочкой, не забудьте сделать еще один отвод от 36-го витка).

Силовой трансформатор нужно изготовлять очень тщательно. Если вы ошибетесь при намотке высоко-частотного или выходного трансформаторов, то большой беды не случится. Просто ваш генератор работать не будет. Ошибка при изготовлении силового трансформатора в лучшем случае приведет к тому, что при проверке его в вашей квартире «сгорят пробки».

Начинать работу по изготовлению трансформатора нужно с разборки сердечника. При этом следует запомнить, как он был собран. Далее, аккуратно смотайте провод подлежащих удалению обмоток. Тщательно заизолируйте обнажившиеся концы сетевой обмотки, внимательно следя за тем, чтобы они не касались друг друга (иначе при включении трансформатора произойдет короткое замыкание). Затем виток к витку проводом ПЭЛ 0,6 намотайте понижающую обмотку. Между слоями этой обмотки помещайте бумажные прокладки. Следите за тем, чтобы

провод из верхних слоев не накладывался на провод нижних. Особенно аккуратно сделайте необходимые отводы. Готовую обмотку покройте слоем лакоткани или высоковольтной изолянты. И, наконец, соберите трансформатор, снабдив его катушку сердечником.

Только после полной сборки трансформатора можно приступить к его испытанию. Если напряжение сети в вашей квартире составляет 220 В, заизолируйте, например, хлорвиниловыми трубками отводы первичной обмотки, предназначенные для включения трансформатора в сеть напряжением 127 и

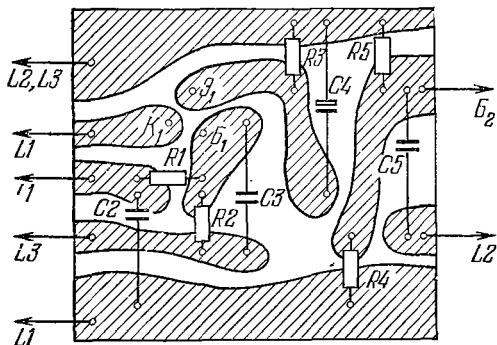


Рис. 12. Плата на фольгированном гетинаксе для печатного монтажа.

Буквами Э₁, Б₁ и К₁ обозначены точки, в которых следует припаять эмиттер, базу и коллектор малоомощного транзистора Т₁.

110 В. Затем включите трансформатор и авометром проверьте наличие нужных напряжений на вторичной обмотке. Трансформатор пригоден для использования, если он работает совершенно бесшумно и не греется.

Монтаж генератора лучше всего осуществить печатным способом. Необходимая для этого монтажная плата изображена на рис. 12. На плате расположены все радиодетали генератора, кроме конденсаторов С₁ и С₆. Конденсатор С₆ припаян непосредственно к выходным гнездам прибора. О том, как изготовить монтажную плату, прочитайте в журналах «Радио» или посоветуйтесь с опытными радиолюбителями. Если раньше вы не имели дело с печат-

ным монтажом, то, быть может, разумнее не использовать его в генераторе, а спаять электронную схему на обычных монтажных планках с лепестками для крепления радиодеталей.

Корпус генератора можно изготовить из листового алюминия или дюрала толщиной около 2 мм. Корпус состоит из шасси и крышки, чертежи которых изображены на рис. 13. На шасси крепятся

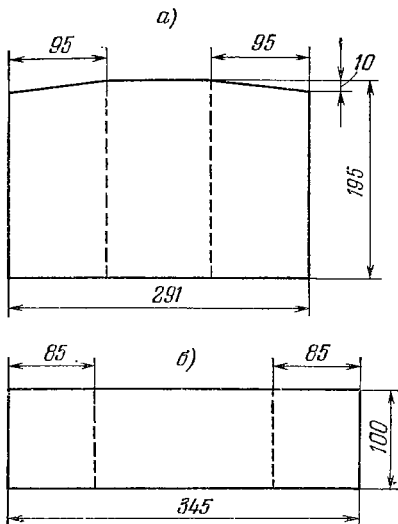


Рис. 13. Чертежи корпуса генератора.

a — крышка; *б* — шасси генератора. Пунктиром показаны линии загиба.

все детали генератора, причем транзистор *T2* прикрепляется к нему снизу четырьмя болтами с гайками. Шасси одновременно служит радиатором мощного транзистора *T2*, предотвращающим его перегрев и выход из строя. Шасси снабжено четырьмя ножками, которые очень удобно изготовить из пластмассовых колпачков к тюбикам зубной пасты. Передняя фальшпанель, также закрепленная на шасси, может быть изготовлена из любого пластика толщиной 1—2 мм. Крышка крепится на шасси с помощью двух металлических уголков, в которых имеются отверстия с резьбой под болты *M 4*. Общий вид генератора изображен на рис. 14.

Проверка и налаживание генератора. Для проверки генератора подключите к его выходу магнитострикционный излучатель и подайте на генератор питающее напряжение величиной 10 В. При этом, если настроечный сердечник высокочастотного трансформатора полностью вдвинут внутрь его каркаса, излучатель должен издавать слабый звук высокой частоты. При отсутствии звука (т. е. генерации) необходимо изменить знак обратной связи задающего генератора, поменяв местами концы обмотки $L1$



Рис. 14 Общий вид ультразвукового генератора низкой частоты на транзисторах

высокочастотного трансформатора. Если прибор правильно собран, то после этого он сразу начинает работать.

На верхний торец ферритового вибратора излучателя поместите лезвие безопасной бритвы и медленно выдвигайте настроечный сердечник из каркаса высокочастотного трансформатора. При этом возможны два нежелательных случая: либо вам не удастся настроить генератор в резонанс с вибратором длиной 140—160 мм (напомним, что о наступлении резонанса можно судить по появлению дребезжащего звука), либо такая настройка произойдет при значительном выдвигании сердечника. В обоих случаях изменением емкости контурного конденсатора $C2$ генератора нужно добиться того, чтобы настройка в резонанс с указанным вибратором происходила при выдвигании сердечника на 5—10 мм из каркаса трансформатора.

После наладки генератора испытайте его на напряжении 20 В: прибор должен работать совершенно стабильно, и мощный транзистор Т2 не должен сильно нагреваться.

Предупреждаем, что при настройке генератора в резонанс с ненагруженным вибратором амплитуда колебаний последнего может достичь столь значительной величины, что под действием ультразвука ферритовый вибратор будет разорван на части.

Построенный вами транзисторный ультразвуковой генератор обеспечивает получение переменного напряжения в диапазоне частот примерно от 15 до 50 кГц. Для удобства работы с прибором его желательно градуировать по частоте. Сделать это можно в школьном физическом кабинете, пользуясь частотомером или звуковым генератором и осциллографом (градуировка по фигурам Лиссажу). Посоветуйтесь с учителем физики, и он окажет вам необходимую помощь. Градуировку генератора можно произвести и дома, воспользовавшись тем, что резонансные частоты вибраторов излучателей нетрудно рассчитать.

Несколько советов тем, кто впервые собирает электронный прибор. Работу следует начать с изготовления силового трансформатора. После его сборки прямо на столе спаяйте выпрямитель, состоящий из диода и электролитического конденсатора. Авометром проверьте работу выпрямителя.

Изготовьте высокочастотный и выходной трансформаторы. При этом не нужно вытачивать их каркасы на токарном станке. Просто возьмите стеклянные трубки внутренним диаметром 9—10 мм и, надев на их концы резиновые колечки, намотайте трансформаторы. Безусловно, эти трансформаторы впоследствии придется переделать, но это вовсе не означает, что пока их можно изготовить небрежно. Старайтесь намотать их как можно аккуратнее, что позволит вам в дальнейшем чувствовать себя гораздо увереннее.

Из листа дюралю толщиной 1—2 мм вырежьте пластинку размером 100×150 мм². Болтами с гайками укрепите на ней четыре ножки из колпачков от

зубной пасты. В центре панели закрепите мощный транзистор, а рядом расположите две монтажные планки. Входные и выходные клеммы прибора укрепите на стойках из изоляционного материала, расположенных по краям панели. Спаяйте электронную схему генератора.

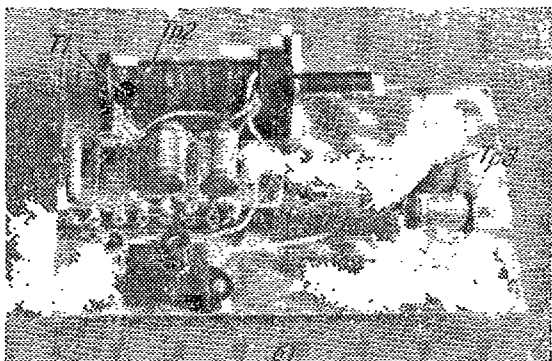
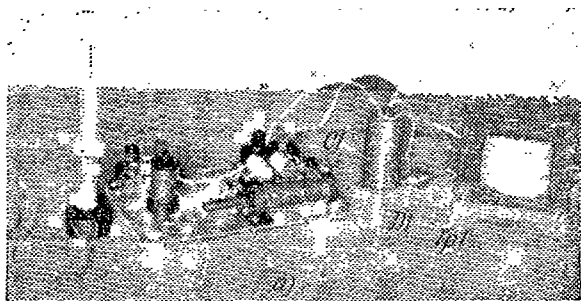


Рис. 15. Экспериментальная модель ультразвукового генератора низкой частоты на транзисторах.
а — генератор вместе с излучателем и выпрямителем; б — монтаж генератора на открытой панели.

Подключите экспериментальную модель прибора к выпрямителю, а к выходу генератора подсоедините излучатель. На столе у вас получился «разбросанный в разные стороны» генератор. Внимательно посмотрите, не замыкаются ли где-либо проводники, и

только после этого включите питание. Теперь произведите налаживание генератора в соответствии с приведенным выше описанием.

Если вы добились правильной работы генератора, приступите к изготовлению окончательных высокочастотного и выходного трансформаторов. Отпаяв из схемы трансформаторы на стеклянных трубках, впаяйте новые и вновь наладьте генератор. С получившимся прибором (рис. 15) уже можно ставить опыты, однако лучше все же собрать его в корпусе так, чтобы были соблюдены требования техники безопасности.

Задание 5. Используя никелевую полоску в качестве вибратора магнитострикционного излучателя, отградуируйте по частоте самодельный ультразвуковой генератор.

ПОДМАГНИЧИВАНИЕ ВИБРАТОРА ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ТОКОМ

Вполне может случиться так, что на первых порах вы не сумеете подобрать постоянных керамических магнитов для поляризации вибратора магнитострикционного излучателя. В этом случае подмагничивание вибратора следует осуществить постоянным электрическим током, проходящим — вместе с переменным от генератора — по обмотке возбуждения излучателя.

Принципиальная схема приставки для подмагничивания вибратора приведена на рис. 16. Конденсатор $C1$ предохраняет выходную цепь генератора от прохождения по ней постоянного тока, а высокочастотный дроссель $Dp1$ (содержащий 200 витков провода ПЭЛ 0,51, намотанных внавал на ферритовый стерженек диаметром 8 мм и длиной 40—50 мм) препятствует прохождению тока высокой частоты по источнику питания.

Для получения от излучателя ультразвуковых колебаний максимальной интенсивности необходимо экспериментально подобрать оптимальную величину тока подмагничивания. Чтобы вам было легче сделать это, укажем, что для ферритового вибратора, основная резонансная частота которого составляет

около 20 кГц, ток подмагничивания должен быть примерно равен 1 А. Регулировку тока подмагничивания следует производить изменением сопротивления проволочного резистора $R1$. Приставка для подмагничивания питается постоянным током от того же выпрямителя, что и генератор (в конструкции ультразвукового генератора предусмотрены специальные гнезда, на которые выведено постоянное напряжение от выпрямителя).

Вместо фабричного переменного резистора $R1$ можно самостоятельно изготовить постоянный. Возьмите кусок нихромового провода диаметром около

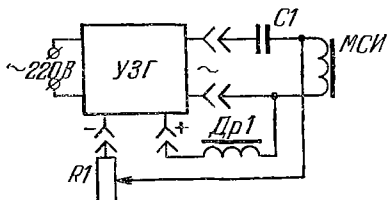


Рис. 16. Принципиальная схема приставки для подмагничивания вибратора электрическим током, проходящим по обмотке возбуждения излучателя.

Конденсатор $C1=0,1-0,2$ мкФ, переменный резистор $R1=20$ Ом

0,6 мм и длиной 0,5 м и, подсоединив его в цепь вместо резистора $R1$, начинайте постепенно уменьшать его длину, добиваясь максимальной амплитуды колебаний ферритового вибратора при резонансе. Подобрать оптимальную длину провода, намотайте его на высокоомный резистор мощностью 2 Вт, используя его в качестве каркаса, и впаяйте получившийся постоянный резистор в приставку для подмагничивания.

УЛЬТРАЗВУКОВАЯ ПРИСТАВКА К ШКОЛЬНОМУ УСИЛИТЕЛЮ

Если не удалось достать мощный транзистор для ультразвукового генератора, можно на весьма доступном маломощном транзисторе собрать простую приставку, превращающую школьный усилитель низкой частоты типа УНЧ-3 в ультразвуковой генератор.

Принципиальная схема установки для получения ультразвука частотой около 20 кГц изображена на рис. 17. На резисторе $R1$, диоде $D1$ и конденсаторе

С1 собран выпрямитель с фильтром. В исходном состоянии при подаче напряжения питания транзистор $T1$, работающий в лавинном режиме, заперт. От выпрямителя через резисторы $R2$ и $R3$ заряжается конденсатор $C2$. Когда напряжение на нем станет равно напряжению включения транзистора, конденсатор разряжается через резистор $R5$ и переход эмиттер — коллектор транзистора. Напряжение на конденсаторе уменьшается до напряжения запираания транзистора, и далее процесс повторяется вновь. При этом на конденсаторе появляется переменное пилообразное напряжение, частоту которого в определенных

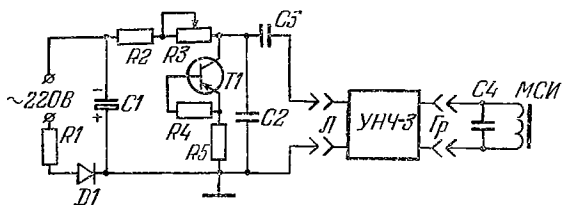


Рис. 17. Принципиальная схема ультразвуковой приставки к школьному усилителю.

Радиодетали: транзистор $T1$ типа П401, диод $D1$ типа Д7Ж; резисторы: $R1$ (3,9 кОм), $R2$ (11 кОм), $R3$ (470 кОм), $R4$ (2,2 кОм), $R5$ (560 Ом); конденсаторы: $C1$ (10,0 мкФ×450 В), $C2$ (2400 пФ), $C3$ (2000 пФ), $C4$ (0,1 мкФ).

пределах можно регулировать переменным резистором $R3$. Через разделительный конденсатор $C3$ пилообразное напряжение поступает на вход $Л$ школьного усилителя типа УНЧ-3. К выходу $Гр$ усилителя подключен магнестрикционный излучатель МСИ. Для лучшего согласования излучателя с выходом усилителя (т. е. для повышения интенсивности ультразвуковых колебаний вибратора) обмотку возбуждения можно зашунтировать конденсатором $C4$.

Ультразвуковую приставку можно смонтировать на П-образной панели из винипласта размером $30 \times 70 \times 100$ мм³. Поскольку питание приставки осуществляется от сети переменного тока, монтаж прибора должен быть защищен крышкой из изоляционного материала.

Порядок работы с приставкой достаточно прост. Соберите по приведенной выше схеме установку и подайте питание на приставку и усилитель. Далее,

переменным резистором изменяйте частоту колебаний, настраивая приставку в резонанс с вибратором магнитострикционного излучателя. При этом, если на торце вибратора находится лезвие, должно наблюдаться его дребезжание.

Недостатком описанной приставки является зависимость частоты вырабатываемых ею пилообразных колебаний от напряжения сети.

Задание 6. Попробуйте для получения ультразвука использовать приставку и усилитель старого электропроигрывателя.

НЕСКОЛЬКО ОПЫТОВ С МАГНИТОСТРИКЦИОННЫМ ИЗЛУЧАТЕЛЕМ

Начинать работу с изготовленными вами приборами нужно с простейших опытов, которые позволят уяснить себе особенности этих приборов и приобрести элементарные навыки обращения с ними. Несколько таких опытов описано ниже.

Магнитострикционный излучатель с ферритовым вибратором длиной 160 мм поставьте вертикально на стол и подключите его обмотку возбуждения к выходу ультразвукового генератора. Вибратор излучателя должен быть расположен в каркасе обмотки возбуждения совершенно свободно так, чтобы его нижний торец находился на поверхности стола.

Над вибратором в лапке штатива закрепите стеклянную трубку внутренним диаметром 5—6 мм и длиной примерно 30 см; нижний конец трубки должен находиться на расстоянии 0,5—1 мм от торца вибратора. В трубку на вибратор поместите стальной шарик диаметром около 3 мм.

Включите генератор и выдвиганием настроенного сердечника из каркаса высокочастотного трансформатора постепенно повышайте частоту ультразвука. Как только частота генератора совпадет с основной собственной частотой вибратора, шарик на торце начнет подпрыгивать (рис. 18). Это свидетельствует о значительном увеличении амплитуды колебаний вибратора при резонансе. Высота, на которую поднимется шарик после нескольких ударов его о

торец вибратора, нередко превышает 30 см, так что шарик — если вы окажетесь невнимательны — может просто выскочить из трубки.

Рекомендуем повторить этот опыт несколько раз. Магнитострикционный излучатель ультразвука работает только на резонансных частотах, поэтому имеет смысл немного потренироваться, чтобы в дальнейшем уверенно настраивать ультразвуковой генератор в резонанс с вибратором.

Только что поставленный вами опыт вполне аналогичен (разве лишь более эффектен) описанному

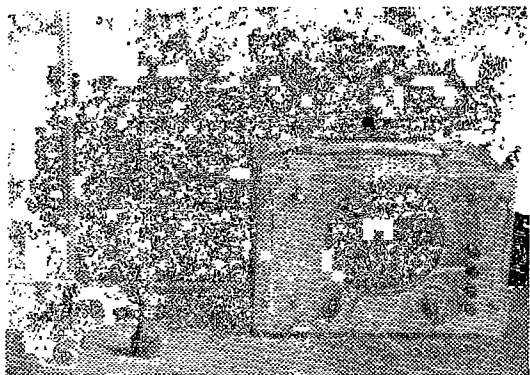


Рис. 18. Обнаружение ультразвуковых колебаний вибратора с помощью стального шарика.

Опыт можно поставить и с самодельным ультразвуковым генератором.

выше опыту с дребезжащим лезвием на вибраторе. Пользуясь транзисторным ультразвуковым генератором, повторите оба эти опыта один вслед за другим. Сопоставьте результаты опытов, выявите общие черты явлений и различия между ними.

Продолжим экспериментальное изучение магнитострикционного излучателя. Мы уже говорили, что при совпадении частоты генератора с основной собственной частотой вибратора в последнем устанавливается стоячая ультразвуковая волна и на всей длине вибратора укладывается половина длины волны звука в феррите. При этом мы ссылались на то, что стоячая волна в свободном стержне образуется

благодаря интерференции бегущих волн, отраженных от торцов стержня. Коэффициент отражения звуковой волны на границе твердое вещество — газ мы принимали равным практически единице.

Теперь экспериментально докажем все это. Пальцами возьмитесь за конец вибратора, возбужденного на основной частоте (рис. 19, а). Вы почувствуете, что вибратор стал «скользким». Сожмите пальцы (или прижмите один из них к торцу вибратора) и у вас возникнет ощущение легкого ожога. Выключите

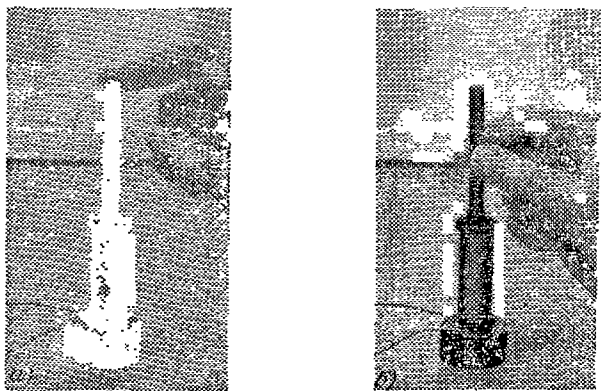


Рис. 19. Обнаружение колебаний вибратора магнитострикционного излучателя.

ультразвук. Все эти ощущения немедленно исчезают. Очевидно, наблюдаемые явления объясняются просто тем, что конец вибратора совершает колебания с большой частотой и заметной амплитудой.

Перемещайте пальцы к середине вибратора (рис. 19, б). Тогда ощущение «скользкости» вибратора уменьшится, а когда вы дойдете до его середины, оно вообще пропадет. Это говорит о том, что амплитуда колебаний вибратора постепенно уменьшается к его середине. Из опыта следует, что в середине вибратора действительно находится узел, а по краям — пучности смещений, т. е. в вибраторе устанавливается стоячая волна.

На стол под вибратор излучателя налейте несколько капель воды так, чтобы нижний торец ви-

братора оказался в воде. Вновь повторите опыт с дребезжащим лезвием или прыгающим шариком. Вы обнаружите, что дребезжания сильно ослабли, а шарик при резонансе подпрыгивает на высоту не более 0,5—1 см.

Что произошло с излучателем? Куда девалась та энергия, которая заставляла подпрыгивать шарик до высоты в несколько десятков сантиметров? Да, она «ушла» буквально в стол!

Коэффициент отражения звука на границе между твердым веществом и жидкостью значительно меньше единицы. Значит, в опыте от нижнего торца вибратора отражается ультразвуковая волна, имеющая существенно меньшую амплитуду, чем в том случае, когда между вибратором и столом находилась воздушная прослойка. А так как в вибраторе интерферируют волны разных амплитуд, то в результате получается и стоячая, и бегущая волны, причем, поскольку бегущая волна уносит с собой часть энергии, амплитуда стоячей волны, естественно, уменьшается. Этим и объясняется снижение амплитуды колебаний торца вибратора.

Внимательно проанализируйте поставленные вами опыты. Постройте из экспериментальных результатов логическую цепочку, сопоставимую с выводами элементарной теории магнитострикционного излучателя. Иными словами, из эксперимента выведите заключения, подтверждающие правильность теории.

Мы уже несколько раз говорили о коэффициенте отражения ультразвука, не определяя этого понятия. Настало время заменить интуитивное представление строгим.

Коэффициентом отражения ультразвука называется отношение интенсивности волны, отраженной от границы раздела двух сред, к интенсивности падающей волны

$$R = I_{\text{отр}}/I_{\text{пад}} \quad (25)$$

Отношение интенсивности волны, проходящей через границу раздела сред, к интенсивности падающей волны называется коэффициентом пропускания

$$D = I_{\text{пр}}/I_{\text{пад}} \quad (26)$$

Согласно закону сохранения энергии интенсивность проходящей волны равна разности между интенсивностями падающей и отраженной волн:

$$I_{\text{пр}} = I_{\text{пад}} - I_{\text{отр}}. \quad (27)$$

Отсюда следует, что коэффициенты пропускания и отражения связаны между собой формулой

$$D = 1 - R. \quad (28)$$

Ультразвуковая волна, распространяющаяся по вибратору, падает на его торец нормально. Торце вибратора является границей раздела двух сред, например, феррита и воздуха. Смещения частиц, непосредственно примыкающих к границе раздела двух сред и принадлежащих разным средам, очевидно, должны быть одинаковы. Но в одной среде смещения частиц обусловлены падающей и отраженной волнами, а в другой — только проходящей волной. Поэтому для амплитуд этих трех волн на границе раздела сред можно записать

$$A_{\text{пад}} + A_{\text{отр}} = A_{\text{пр}}. \quad (29)$$

Это уравнение совместно с уравнением (27), в котором интенсивности заменяются их значениями из формулы (11), образует систему

$$A_{\text{пад}} + A_{\text{отр}} = A_{\text{пр}}, \quad (A_{\text{пад}}^2 - A_{\text{отр}}^2) \rho_1 c_1 = A_{\text{пр}}^2 \rho_2 c_2.$$

Решая эту систему уравнений, получим

$$A_{\text{отр}} = A_{\text{пад}} \frac{\rho_1 c_1 - \rho_2 c_2}{\rho_1 c_1 + \rho_2 c_2} \quad \text{и} \quad A_{\text{пр}} = A_{\text{пад}} \frac{2\rho_1 c_1}{\rho_1 c_1 + \rho_2 c_2}. \quad (30)$$

Проанализируем формулу для амплитуды отраженной волны. Если акустическое сопротивление среды, из которой падает ультразвук, больше акустического сопротивления среды, в которую переходит ультразвук, т. е. $\rho_1 c_1 > \rho_2 c_2$, то амплитуда отраженной волны имеет тот же знак, что и амплитуда падающей, $A_{\text{отр}} > 0$. Если же $\rho_1 c_1 < \rho_2 c_2$, то $A_{\text{отр}} < 0$. Отрицательная амплитуда не имеет физического смысла. Знак минус перед амплитудой в уравнении волны означает, что фаза волны изменилась на π :

$$-A \sin \omega(t - x/c) = A \sin [\omega(t - x/c) + \pi].$$

Таким образом, фаза ультразвуковой волны меняется на π (происходит «потеря полуволны»), если ультразвук отражается от среды с большим акустическим сопротивлением. Отражение от среды с меньшим акустическим сопротивлением не приводит к изменению фазы отраженной волны. Наконец, как показывают формулы (30), на границе раздела двух сред с одинаковыми акустическими сопротивлениями вообще не происходит отражения и ультразвук полностью переходит из одной среды в другую.

Из формул (30) нетрудно получить выражения для коэффициентов отражения и пропускания при нормальном падении ультразвука на границу раздела сред

$$R = \left(\frac{\rho_1 c_1 - \rho_2 c_2}{\rho_1 c_1 + \rho_2 c_2} \right)^2 \quad \text{и} \quad D = \frac{4\rho_1 c_1 \rho_2 c_2}{(\rho_1 c_1 + \rho_2 c_2)^2}. \quad (31)$$

Задание 7. По формулам (31) вычислите коэффициенты отражения и пропускания для границ раздела феррит — вода и феррит — воздух. Сравните полученные значения. Сопоставьте выводы теории с результатом эксперимента, в котором нижний торец вибратора находится в воде. Не правда ли, наиболее поразительно в этом опыте то, что изменение условий колебания одного конца вибратора немедленно влияет на величину амплитуды колебаний другого его конца!

Вибратор в каркасе обмотки возбуждения излучателя расположите совершенно свободно и, включив генератор, добейтесь максимальной интенсивности ультразвука. Спустя небольшое время вибратор будет разорван ультразвуком на части. Результат опыта свидетельствует о громадных напряжениях, возникающих в ферритовом стержне под действием ультразвуковых колебаний.

Интересно отметить, что чаще всего вибратор разрывается примерно посередине на две части, но иногда он сразу разламывается на четыре и большее число частей. Опыты по разрыву вибраторов лучше производить с описанным ниже магнитострикционным излучателем без подмагничивания.

Из обломков ферритового стержня постройте излучатели на более высокие частоты: они вам пригодятся в дальнейших опытах. При изготовлении

излучателей экспериментально подберите оптимальное число витков обмотки возбуждения и величину



Рис. 20. Установка для проведения опыта по заданию 12.

Вместо того чтобы закреплять излучатель в штативе, при выполнении опыта его можно держать в руке.

подмагничивающего вибратор поля. Эта работа позволит вам достаточно глубоко прочувствовать конструктивные особенности магнитострикционного излучателя.

Задание 8. В продаже чаще, чем круглые, встречаются плоские ферритовые стержни размером $3 \times 20 \times 100$ мм³. Можно ли их использовать в качестве вибраторов магнитострикционных излучателей?

Если можно, то продумайте конструкцию и изготовьте излучатель с плоским вибратором. Каковы недостатки такого излучателя?

Задание 9. Можно ли в одном излучателе использовать несколько плоских ферритовых вибраторов?

Задание 10. Докажите, что в магнитострикционном излучателе описанной конструкции никелевый вибратор менее выгоден, чем ферритовый.

Задание 11. Изменяйте напряженность поляризирующего вибратор магнитного поля, для чего уменьшайте или увеличивайте число магнитов на каркасе обмотки возбужде-

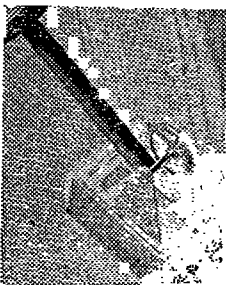


Рис. 21. Установка к опыту, предлагаемому в задании 13

ния излучателя. Как зависит интенсивность ультразвука от величины магнитного поля?

Задание 12. Круглый ферритовый вибратор с помощью резинового колечка, расположенного по его середине, закрепите в каркасе обмотки возбуждения излучателя. Торцом вибратора, наклоненного примерно на 45° к горизонту, прикоснитесь к стальной линейке, лежащей на стеклянной пластинке или гладкой поверхности стола (рис. 20). Включите генератор и настройте его в резонанс с вибратором. Что вы при этом наблюдаете? Попробуйте объяснить явление.

Задание 13. К стальной оси припаяйте легкий диск из жести или латуни. Ось с диском укрепите на подставке так, чтобы она могла вращаться с небольшим трением. Прикоснитесь боковой поверхностью торца вибратора излучателя (рис. 21) к оси и включите ультразвук. Объясните наблюдаемое явление.

УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ГЕНЕРАТОР НА ЛАМПАХ

Ламповые генераторы высокой частоты обладают тем существенным преимуществом перед транзисторными, что они при более простой принципиальной схеме обеспечивают получение ультразвука, частота которого значительно превышает 50 кГц. В принципе и на транзисторах можно собрать ультразвуковые генераторы высокой частоты. Однако пригодные для этого транзисторы пока мало распространены и трудно доступны. Поэтому мы и рекомендуем наряду с транзисторным изготовить простой и достаточно мощный ламповый генератор.

Ламповый генератор имеет только один недостаток — он требует высокого анодного напряжения. В этом смысле он гораздо опаснее транзисторного. Об этой опасности нужно помнить, но ее не следует преувеличивать: выполнение элементарных требований техники безопасности сведет возможность поражения электрическим током к минимуму.

Принципиальная схема прибора изображена на рис. 22. Это обычный двухтактный генератор с емкостной обратной связью, выполненный на двух электронных лампах типа 6ПЗС, включенных триодами. Частота генератора определяется параметрами

колебательного контура, состоящего из первичной обмотки $L1$ высокочастотного трансформатора $Tr1$ и конденсатор $C3$. Настройка генератора на нужную частоту осуществляется изменением индуктивности контурной катушки $L1$ — перемещением внутри каркаса этой катушки настроечного ферритового сердечника.

Конденсаторы $C1$ и $C2$ обеспечивают положительную обратную связь в генераторе. Резисторы $R1$ и $R2$ служат сопротивлениями утечек в цепях сеток ламп. Магнитострикционный излучатель МСИ подключается

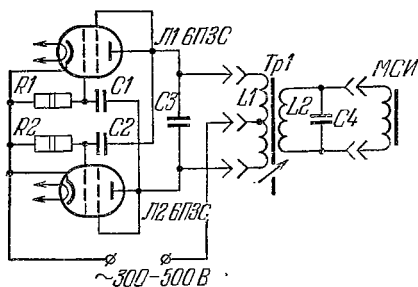


Рис. 22. Принципиальная схема электронного генератора на лампах, обеспечивающего получение ультразвука низкой и средней частот.

Радиодетали: конденсаторы $C1=C2$ (1000 пФ), $C3$ (1000–2000 пФ, подбирается), $C4$ (0,04–0,1 мкФ); резисторы: $R1=R2$ (30 кОм).

ко вторичной обмотке $L2$ высокочастотного трансформатора. Конденсатор $C4$ предназначен для оптимального согласования выхода генератора с излучателем.

Генератор питается переменным током. Величина анодного напряжения может быть выбрана в пределах 300—500 В; накальное напряжение для ламп типа 6П3С должно составлять 6,3 В. Поскольку анодное напряжение переменное, генератор вырабатывает модулированные (с частотой осветительной сети 50 Гц) колебания высокой частоты. Этим он отличается от транзисторного генератора, дающего немодулированные синусоидальные колебания.

Разумеется, генератор можно питать и постоянным током. Однако, поскольку это требует изготовления выпрямителя и в целом не дает никаких преимуществ, вряд ли в столь неоправданном усложнении конструкции прибора есть какой-то смысл.

Изображенная на рис. 22 схема генератора не содержит блока питания. В качестве такого блока можно использовать любой фабричный или самодельный трансформатор мощностью не ниже 60 Вт, преобразующий сетевое напряжение 220 В (или 127 В) в напряжения 6,3 В и примерно 300 и 500 В.

Блок питания. Подготовку к изготовлению генератора следует начинать с подбора или изготовления силового трансформатора.

Покажем, как использовать трансформатор типа ТС-4 (или близкий к нему по параметрам) в блоке питания генератора. Этот трансформатор содержит сетевую обмотку на 220 В, часть которой может быть использована для включения в сеть напряжением 127 В, повышающую обмотку на 240 В и накальную на 6,3 В (см. рис. 11). Если соединить сетевую и повышающую обмотки последовательно и согласно (т. е. так, чтобы образовалась как бы одна катушка, намотанная в одну сторону), то

от получившегося в результате этой операции автотрансформатора можно взять напряжения около 370 и 460 В (рис. 23). Такие значения анодного напряжения вполне пригодны: для получения более интенсивного ультразвука надо будет использовать большее напряжение, менее интенсивного — меньшее. Единственно, что нужно сделать — это правильно соединить обмотки трансформатора. Для контроля правильности соединения воспользуйтесь авометром: если неверно подсоединить обмотки, то результирующее напряжение окажется равным не сумме, а разности исходных.

Необходимо иметь в виду, что автотрансформатор «более опасный» прибор, чем трансформатор. Дело в том, что один провод осветительной сети заземлен. Если вы случайно заденете другой провод («фазовый»), то, поскольку между человеком и землей всегда существует более или менее хороший контакт,

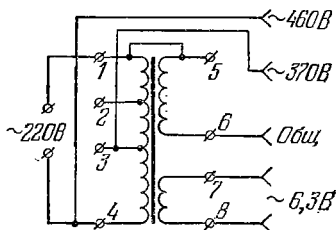


Рис. 23. Принципиальная схема автотрансформатора для блока питания.

вас «дернет» электрическим током. Напряжение, приложенное к телу, окажется равным 220 В. Повышающий автотрансформатор дает напряжение 460 В; ясно, что все это напряжение может оказаться между какой-то точкой схемы генератора и землей.

Поэтому для исключения возможности поражения электрическим током высокого напряжения конструкции блока питания, собранного по автотрансформаторной схеме, и генератора должны быть такими, чтобы в них не было изолированных мест соединения проводников или радиодеталей.

Радиолюбители часто собирают свои приемники так, что их шасси соединено с отрицательным полюсом источника питания. При использовании автотрансформатора соединение металлического шасси с одним из проводов анодного напряжения совершенно недопустимо. Можно собрать и блок питания, и генератор в металлических корпусах (хотя лучше с этой целью использовать диэлектрик), но к этим корпусам не должно подводиться напряжение (с корпусом не должна электрически соединяться ни одна радиодеталь).

Почему мы столь подробно рассмотрели все это? Конечно, гораздо проще привести схему необходимого силового трансформатора и мимоходом сказать, что в приборе использовать автотрансформатор не рекомендуется. Однако многих желающих собрать ламповый генератор осенит счастливая идея (и она действительно неплоха) — вместо того, чтобы мотать силовой трансформатор, использовать готовый, превратив его в автотрансформатор. Лучше знать все возможные последствия такой замены и сделать ее правильно, а не подвергать себя из-за своей неосведомленности проверке на собственном теле «прелестей» физиологического действия тока.

Детали и конструкция генератора. Единственной (и очень ответственной) самодельной деталью лампового генератора является высокочастотный трансформатор. Его лучше всего намотать на плоском каркасе из диэлектрика (оргстекла, винипласта, текстолита и т.п.), изготовленном согласно чертежу, представленному на рис. 24. Первичная обмотка L_1 трансформатора (см. рис. 22) состоит из двух одинаковых и намотанных в одну сторону сек-

ций по 300 витков провода ПЭЛ 0,41 в каждой. Вторичная обмотка L_2 содержит 100 витков провода ПЭЛ 0,8—1,0. Настраиваемым сердечником трансформатора служит плоский ферритовый стержень марки М400НН размером $3 \times 20 \times 100$ мм³.

На каркас трансформатора вначале укладывается первичная обмотка. Мотать ее нужно виток к витку, тщательно изолируя тонкой бумагой каждый слой и выводы обмотки. Между первичной и вторичной обмотками следует проложить слой лакоткани или высоковольтной изолянты.

От качества изготовления высокочастотного трансформатора полностью зависит нормальная работа генератора. Может случиться так, что, включив для проверки собранный генератор, вы сразу получите ультразвук, а спустя некоторое время он неожиданно исчезнет. Это означает, что пробита небрежно намотанная первичная обмотка трансформатора. Поэтому при изготовлении трансформатора нужно особенно внимательно следить за тем, чтобы витки верхних слоев обмотки не соприкасались с витками нижних.

Данные остальных радиодеталей не критичны. Следует только иметь в виду, что конденсаторы должны быть рассчитаны на рабочее напряжение не ниже 500 В, а резисторы — на мощность не менее 2 Вт.

Мы не будем подробно описывать конструкцию генератора, предоставив вам разработать ее самостоятельно. Отметим только, что для экспериментальной работы удобнее собрать прибор в виде трех отдельных блоков; блока питания, блока генератора и блока колебательного контура. Это позволит использовать силовой трансформатор не только в опытах с ультразвуком. Кроме того, блочная конструкция генератора удобнее в том отношении, что она позволяет простой заменой блока колебательного контура в широких пределах регулировать диапазон рабочих

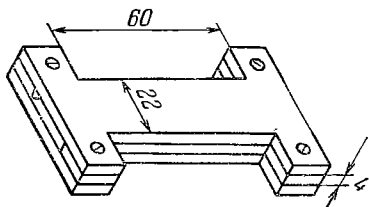


Рис. 24. Конструкция каркаса высокочастотного трансформатора для лампового генератора.

генератора удобнее собрать прибор в виде трех отдельных блоков; блока питания, блока генератора и блока колебательного контура. Это позволит использовать силовой трансформатор не только в опытах с ультразвуком. Кроме того, блочная конструкция генератора удобнее в том отношении, что она позволяет простой заменой блока колебательного контура в широких пределах регулировать диапазон рабочих

частот генератора. Внешний вид ультразвукового генератора блочной конструкции представлен на рис. 25.

Для увеличения мощности генератора в приборе можно использовать не две, а четыре лампы типа 6ПЗС, попарно соединенные между собой параллельно.

Налаживание генератора. Подключив к выходу прибора низкочастотный излучатель ультразвука, подайте питание на генератор. Если при полностью вдвинутом внутрь каркаса сердечнике высоко-частотного трансформатора будет слышен слабый звук

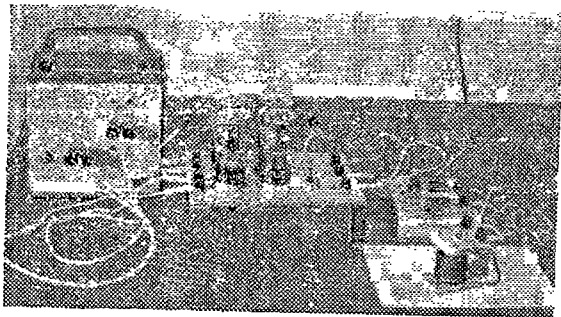


Рис. 25. Ультразвуковой генератор блочной конструкции.
1—блок питания, 2—блок генератора, 3—блок колебательного контура,
4—магнитострикционный излучатель средней частоты.

высокой частоты, то генератор работает. Выдвижением сердечника (при этом, очевидно, увеличивается частота электрических колебаний) добейтесь резонанса: лезвие, помещенное на торец вибратора, должно дребезжать.

Если при включении генератора звук не возникает, то наличие генерации проверьте неоновой лампочкой: она должна загораться при соприкосновении цоколя с одним из крайних концов первичной обмотки высокочастотного трансформатора. Если прибор работает, но излучатель с ферритовым вибратором длиной 160 мм не генерирует ультразвук, то, значит, частота генератора слишком велика. Увеличьте емкость контурного конденсатора и добейтесь возбуждения ультразвуковых колебаний вибратора. Вообще лучше подобрать емкость контурного конденсатора так, что-

бы резонанс с вибратором длиной 160 мм наступал при небольшом выдвигении сердечника из каркаса высокочастотного трансформатора.

Этим налаживание генератора заканчивается. Построенный прибор позволяет поставить все те же опыты с ультразвуком низкой частоты, что и описанный выше транзисторный генератор.

Задание 14. Выясните, можно ли для подмагничивания вибратора применять переменный ток промышленной частоты, пропуская его по обмотке возбуждения излучателя. Если это возможно, разработайте и постройте небольшую приставку для поляризации вибратора переменным током, используя в качестве источника накальную обмотку силового трансформатора блока питания.

Задание 15. Установите, пригоден ли ламповый генератор для возбуждения без подмагничивания достаточно интенсивных ультразвуковых колебаний ферритовых вибраторов. Какой может быть в излучателе максимальная длина вибратора, если он не подмагничивается и колебательный контур генератора собран в соответствии с описанием?

Задание 16. Исследуйте магнестрикционный излучатель без подмагничивания вибратора. Зависит ли интенсивность ультразвука от числа витков и длины катушки возбуждения? Добейтесь получения ультразвука максимальной частоты, которую способен дать ваш генератор.

МАГНЕСТРИКЦИОННЫЙ ИЗЛУЧАТЕЛЬ УЛЬТРАЗВУКА СРЕДНЕЙ ЧАСТОТЫ

Для получения ультразвука в диапазоне частот 100—150 кГц длина ферритового вибратора при возбуждении его на основной частоте должна составлять 15—30 мм. Чтобы возбудить такой вибратор, необходимо повысить частоту лампового генератора. Сделать это можно, изменив параметры колебательного контура.

На таком же каркасе, как и прежний (см. рис. 24), намотайте новый высокочастотный трансформатор. Его первичная обмотка должна содержать две

одинаковые и намотанные в одну сторону секции по 100 витков провода ПЭЛ 0,8 в каждой, а вторичная— 20 витков провода ПЭЛ 1,0.

Вырежьте или подберите готовый (обломок) ферритовый стерженек диаметром 8 мм и длиной около 20 мм. Намотайте бескаркасную обмотку возбуждения, имеющую внутренний диаметр 9 мм и состоящую из 30—35 витков провода ПЭЛ 0,8. На стопу из 3—5 кольцевых керамических магнитов (диаметром 35 мм и толщиной 7 мм) поместите вертикально ферритовый вибратор и наденьте на него изготовленную обмотку. Нанесите на верхний торец вибратора каплю воды (рис. 26). Включите генератор и выдвиганием сердечника из каркаса высокочастотного трансформатора попытайтесь настроить прибор в резонанс с вибратором.

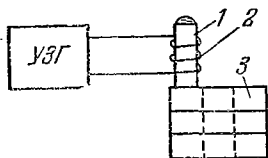


Рис. 26. К возбуждению ультразвуковых колебаний ферритового вибратора длиной около 20 мм.

1—ферритовый вибратор,
2—обмотка возбуждения,
3—по дмагничивающие вибратор магниты.

Если это удастся, вы заметите, как капля на торце вибратора начнет колебаться. Часто эти колебания вначале получаются совсем слабыми: лишь наблюдая поверхность капли в отраженном свете, можно обнаружить на ней своеобразные мелкие «морщинки». Постепенно отматывайте витки обмотки возбуждения и, подстраивая генератор, добивайтесь более интенсивных колебаний вибратора. В результате можно получить ультразвук настолько большой интенсивности, что капля на торце вибратора сильно вспучится и с ее поверхности полетят брызги на высоту до 10—20 см. Под действием столь интенсивных колебаний ферритовый вибратор может быть разорван на части.

Нам кажется, уже не следует много говорить о том, что, ставя опыты по получению ультразвука средней частоты, нужно следить, чтобы вода не попала в зазор между нижним торцом вибратора и магнитами. Если это произойдет, нужно, выключив генератор, досуха вытереть вибратор, магниты, обмотку возбуждения и только потом вновь повторить опыт

Подобрав оптимальное число витков обмотки возбуждения излучателя (для вибратора длиной 15—20 мм оно колеблется в пределах 15—20 витков), изготовьте окончательную модель излучателя, пригодную для использования в опытах. Конструкция и внешний вид такого излучателя представлены на рис. 27. Ферритовый вибратор закреплен посередине в отверстии диаметром 6 мм, просверленном в резиновом диске. Диаметр резинового диска 20—30 мм, а толщина

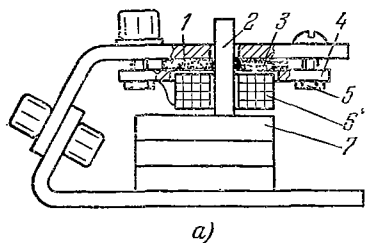


Рис. 27. Конструкция магнестрикционного излучателя ультразвука средней частоты (а) и его внешний вид (б).

1—стойка излучателя, 2—ферритовый вибратор, 3—резиновый диск, 4—текстолитовая шайба, 5—четыре болта с гайками (два из них одновременно являются клеммами), 6—обмотка возбуждения, 7—магниты, поляризующие вибратор. Линейка, прикрепленная к стойке вибратора, используется для измерения длины ультразвуковой волны в жидкости.

его 2—3 мм. Этот диск с помощью вырезанной из тонкого текстолита шайбы и четырех болтов с гайками (два из них одновременно являются клеммами, к которым подключены концы обмотки возбуждения) крепится к стойке излучателя. Стойку лучше всего изготовить из винипласта или оргстекла, причем так, чтобы можно было поднимать и опускать ее верхнюю часть вместе с закрепленным на ней вибратором. Подмагничивание вибратора осуществляется стопой из 3—5 кольцевых керамических магнитов, верхний из которых касается нижнего торца вибратора. Обмотка возбуждения излучателя не должна соприкасаться с вибратором.

Изготовленный вами излучатель ультразвука средней частоты в дальнейшем рекомендуется использо-

вать для постановки сравнительно небольшого числа опытов. Поэтому ниже, говоря просто о магнитоотрицательном излучателе, мы будем иметь в виду ранее описанный низкочастотный излучатель с ферритовым вибратором длиной 100—160 мм. Везде, где в опытах используются излучатели, дающие ультразвук частотой выше 50 кГц, это специально оговорено.

В заключение — несколько советов. Если вам не удастся возбудить ферритовый вибратор длиной около 20 мм, а генератор работает, то нужно подобрать диапазон частот, несколько изменяя емкость контурного конденсатора. С этой целью при наладке в качестве контурного можно использовать школьный демонстрационный конденсатор переменной емкости с воздушным диэлектриком, подключив при необходимости параллельно ему подходящий конденсатор постоянной емкости.

Приведенная схема лампового генератора совершенно надежна и многократно проверена на практике. Поэтому, если что-то не получается, нужно просто очень внимательно сопоставить то, что вы делаете, с описанием и найти возможную ошибку.

Наконец, психологическое замечание. Описанные генераторы с успехом собирали (правда, под руководством старших) учащиеся седьмых-восьмых классов, впервые взявшие в руки паяльник. Так неужели вы не сможете этого сделать?

Задание 17. Выясните, можно ли вибратор излучателя, рассчитанного на получение ультразвука средней частоты, поляризовать электрическим током, проходящим по его обмотке возбуждения.

Задание 18. Изготовьте электромагнит для подмагничивания вибратора магнитоотрицательного излучателя, дающего ультразвук средней частоты.

МАГНИТОТРИЦАЦИОННЫЕ ИЗЛУЧАТЕЛИ УЛЬТРАЗВУКА ВЫСОКОЙ ЧАСТОТЫ

Работа с магнитоотрицательными излучателями высокой частоты гораздо сложнее, чем с низкочастотными излучателями. Объясняется это тем, что не все ферритовые стержни, выпускаемые промышлен-

ностью, однаково успешно можно использовать в высокочастотных излучателях ультразвука. Для получения достаточно хорошего излучателя придется подобрать или изготовить оптимальный ферритовый вибратор. Поэтому работу по изготовлению высокочастотных излучателей и постановку опытов с ними мы рекомендуем начать после того, как вы полностью освоите низкочастотный ультразвуковой излучатель.

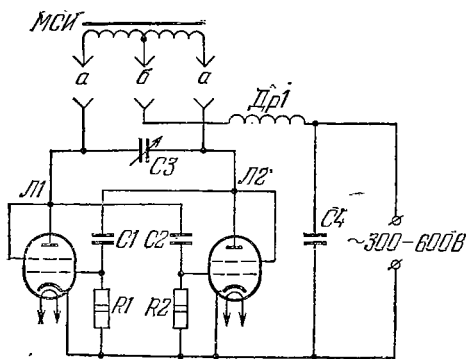


Рис. 28. Принципиальная схема электронного генератора, обеспечивающего получение ультразвука высокой частоты.

Радиодетали: лампы Л1 и Л2 типа 6ПЗС; резисторы: $R1 = R2$ (33 кОм); конденсаторы: $C1 = C2$ (680 пФ, можно подобрать в пределах 240–1000 пФ), $C3$ (10–250 пФ), $C4$ (0,05 мкФ).

Однако было бы ошибкой и преувеличивать трудности этой работы: мы убеждены, что учащиеся старших классов в состоянии изготовить описанные ниже приборы.

Принципиальная схема электронного генератора высокой частоты изображена на рис. 28. Она вполне аналогична схеме генератора, представленной на рис. 22, и поэтому принцип действия прибора не нуждается в особых пояснениях.

Колебательный контур генератора образован непосредственно обмоткой возбуждения магнитоstrictionного излучателя МСИ и конденсатором переменной емкости $C3$. С помощью этого конденсатора производится настройка генератора на резонансную частоту излучателя. Высокочастотный дроссель $Др1$ и блокировочный конденсатор $C4$ выполняют роль

фильтра, предохраняющего источник питания от прохождения по нему тока высокой частоты. Наличие фильтра повышает полезную мощность генератора, выделяющуюся на излучателе.

Напряжение питания генератора может достигать 600 В. При резонансе на колебательном контуре развивается значительно большее напряжение. Поэтому контурный конденсатор переменной емкости должен быть рассчитан на рабочее напряжение не ниже нескольких тысяч вольт. В качестве такого конденсатора при первоначальных опытах можно использовать школьный демонстрационный конденсатор переменной емкости. Однако лучше изготовить его из выпускаемого промышленностью для радиоприемников конденсатора переменной емкости. С этой целью нужно выпаять статоры обеих секций конденсатора, удалить в них и в роторах пластины через одну и затем вновь собрать конденсатор так, чтобы расстояние между его пластинами составляло 1,5—2 мм. Обе секции собранного конденсатора следует соединить между собой параллельно. Нередко, впрочем, удастся подобрать и готовый конденсатор переменной емкости с воздушным диэлектриком, расстояние между пластинами которого колеблется в пределах 1—2 мм (такие конденсаторы лет 20 назад широко использовались в радиоприемниках).

Высокочастотный дроссель $Dp1$ генератора должен содержать 6—10 секций по 300—400 витков провода ПЭЛ 0,25 в каждой, намотанных внавал на плоском каркасе (рис. 29) из винипласта или текстолита толщиной 4—6 мм.

Конструкция генератора может быть произвольной, но она обязательно должна удовлетворять требованиям техники безопасности. Генератор лучше всего собрать на панели из гетинакса или текстолита. Особое внимание следует обратить на крепление четырех гнезд питания генератора и трех гнезд для подключения к прибору магнитострикционных излучателей.

Небольшое отступление. В научных работах не принято писать, как автор получил тот или иной результат. Поэтому, когда читаешь научную статью, невольно возникает ощущение, что рукой

автора водило Провидение и, если оно не будет водить твоей рукой, ты никогда не сможешь сделать ничего подобного. Цель же научно-популярной книги — даже не столько возбудить интерес к предмету, сколько заставить читателя поверить в собственные силы. Это соображение позволяет допустить, что здесь будет уместен небольшой рассказ о том, как были построены магнестрикционные излучатели высокой частоты.

На одной из конференций мы встретились с А. Р. Геннингом, который любезно показал в действии разработанные им ультразвуковой генератор и магнестрикционный излучатель на частоту 20 кГц.

Опыты с этими приборами были настолько прекрасны, что их нельзя было не повторить. Когда спустя неделю или две мы воспроизвели их у себя в институте, нужно было решить, что делать дальше. Посоветовавшись, мы пришли к выводу, что разумно работать в двух

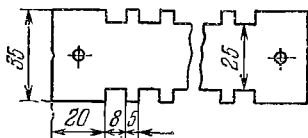


Рис 29. Чертеж каркаса высокочастотного дросселя.

направлениях: максимально упростить электронный генератор, не снижая при этом его мощности, и попытаться — поскольку феррит доступен и отлично работает на низких частотах — получить с помощью ферритовых вибраторов ультразвук максимальной высокой частоты. Насколько скромны были наши желания, следует из того, что в то время частота 150—200 кГц казалась нам почти недостижимой!

Первая задача была решена довольно быстро: мы собрали все описанные в методической и доступной нам специальной литературе ультразвуковые генераторы, исследовали их, сопоставили полученные результаты и остановились на уже хорошо вам знакомом генераторе, собранном на лампах по двухтактной схеме с емкостной обратной связью и индуктивной регулировкой частоты (см. рис. 22 и 28).

Вторая задача оказалась сложнее: короткие вибраторы никак не хотели возбуждаться. Наконец, удалось получить ультразвук с помощью ферритовых стержней диаметром 8 мм и наименьшей длиной

около 30 мм. При этом использовался магнитострикционный излучатель без подмагничивания вибратора (см. задание 16).

Трудности этой работы станут понятнее, если заметить, что генератор и излучатель фактически представляют собой единое целое. При изменении длины вибратора изменяется индуктивность излучателя, меняются параметры колебательного контура, с которым связан излучатель, «уходит» резонансная частота и т. д. Все это приводит к изменению мощности, отдаваемой генератором в излучатель. А мощность генератора и так невелика. И увеличивать ее не имеет смысла: тогда уж лучше вообще бросить это дело и рекомендовать для постановки учебных опытов промышленную ультразвуковую установку.

Помимо подобных трудностей, есть и другие, пожалуй, более неприятные. Исследователь, с большим трудом получивший какой-то экспериментальный результат, в дальнейшем очень неохотно идет на изменение условий эксперимента. Необходимо определенное время, чтобы исследователь внутренне оказался подготовленным к новому этапу работы. Ведь любой новый этап отрицает старый результат, а последний совсем недавно был тем неизведанным новым, к чему исследователь стремился, напрягая все свои душевные и физические силы! Проводя экспериментальную работу, вы очень скоро почувствуете все это.

Спустя примерно год после начала работы (а за это время были поставлены сотни опытов!) мы построили ультразвуковой излучатель средней частоты (см. рис. 27). Как уже отмечалось выше, для возбуждения его вибратора пришлось несколько изменить параметры колебательного контура генератора. Мы попытались и дальше идти по этому пути: еще уменьшили индуктивность контурной катушки генератора. В результате удалось возбудить колебания ферритового вибратора длиной порядка 10 мм. Большого мы получить не смогли.

Неудачи при попытках возбудить еще более короткий вибратор привели к мысли попробовать воспользоваться обмоткой возбуждения излучателя в качестве контурной катушки генератора. Так был построен генератор, схема которого изображена на

рис. 28. Этот генератор позволил получить ультразвук с помощью ферритовых стержней диаметром 8 мм и длиной около 5 мм. Однако рабочая площадь таких вибраторов мала и возможности их применения ограничены. Поэтому в дальнейшем в качестве вибратора использовалась круглая пластинка (диск) диаметром 20 мм, вырезанная из плоского ферритового стержня толщиной 3 мм.

Опыты по возбуждению этого вибратора продолжались довольно долго. Менялись генераторы, обмотки возбуждения, полярирующие вибратор магниты, а успеха все не было. Слабенький ультразвук получался, но это было далеко не то, что нужно.

В опытах плоский вибратор помещался непосредственно на магниты; обмотка возбуждения, как и во всех других магнитострикционных излучателях, была параллельна излучающей плоскости вибратора (рис. 30), т. е. намотана по длине — или здесь лучше сказать по толщине — вибратора. Конечно, работать с такой обмоткой возбуждения неприятно, но мы надеялись в случае успеха придумать приемлемую конструкцию излучателя.

После месяцев работы однажды стало совершенно ясно, что построить высокочастотный магнитострикционный излучатель ультразвука не удастся. Жаль было потраченных усилий — к этому нужно всегда быть готовым, — а того, что доказать возможность или невозможность получения ультразвука высокой частоты и достаточной интенсивности определенно не удалось. Работа в тот день продолжалась по инерции и не так тщательно, как обычно. Обмотка возбуждения соскочила с излучателя, стала под углом к поверхности вибратора, и не было ни сил, ни желания поправить ее — все равно ничего не получается! Однако, когда была произведена настройка в резонанс,

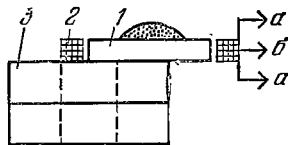


Рис. 30. Экспериментальная модель магнитострикционного излучателя для получения ультразвука высокой частоты.

1 — плоский ферритовый вибратор, 2 — обмотка возбуждения, 3 — подмагничивающие вибратор магниты. Выводы а, б, а обмотки возбуждения подключаются к соответствующим гнездам генератора, схема которого приведена на рис. 28.

ультразвук как будто стал интенсивнее. Мы вновь проверили это наблюдение, теперь уже специально разместив обмотку возбуждения перпендикулярно к плоскости излучателя: появились мощные ультразвуковые колебания! Впереди был еще целый год работы, но в принципе этим «случайным» наблюдением проблема была решена.

Отличительная особенность всех описанных ниже высокочастотных излучателей ультразвука заключается в том, что в них используются колебания вибраторов, происходящие в направлении, перпендикулярном к направлению изменения напряженности возбуждающего эти колебания переменного магнитного поля. В низкочастотных же излучателях вибраторы совершают ультразвуковые колебания в направлении, совпадающем с направлением переменного магнитного поля. Допустить возможность такого отличия высокочастотных излучателей от низкочастотных в принципе не трудно. Однако поверить в его необходимость после того, как сформировался определенный стереотип в работе с низкочастотными излучателями, почти невозможно. Необходимо было либо случайное наблюдение, либо опыт, поставленный по принципу: «а что получится, если наугад изменить условия?», чтобы от низкочастотных излучателей перейти к высокочастотным.

Магнитострикционный излучатель для получения ультразвука частотой порядка 1 МГц состоит из ферритового вибратора 1, обмотки возбуждения 2 и подмагничивающих вибратор магнитов 3 (рис. 31).

Вибратором служит плоский ферритовый стержень марки М40ОН размером $3 \times 20 \times 100$ мм³. Вибратор совершает колебания по своей толщине, и при возбуждении на основной собственной частоте между излучающими плоскостями вибратора укладывается половина длины волны (3 мм) ультразвука в феррите. Расчет и измерения показывают, что частота ультразвука в этом случае заключена в пределах 0,9—1,2 МГц (не все ферритовые стержни одной марки обладают одинаковыми свойствами). Вибратор в каркасе обмотки возбуждения расположен совершенно свободно (никак не закреплен).

Обмотка возбуждения излучателя содержит две секции по 23—27 витков в каждой, намотанные проводом ПЭЛ 0,8—1,0 на плоском каркасе, конструкция и размеры которого показаны на рис. 32. Секции намотаны в одну сторону и разделены тонкой текстолитовой перегородкой.

Для подмагничивания вибратора использована стопа из 3—6 кольцевых керамических магнитов диаметром 35 мм и толщиной 7 мм. Магниты должны касаться вибратора и могут располагаться относительно него, вообще говоря, как угодно. Необходимо иметь в виду, что увеличение напряженности подмагничивающего вибратор постоянного магнитного поля

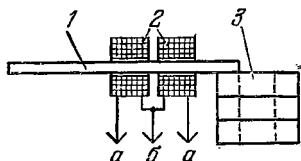


Рис. 31. Схема несимметричного магнитострикционного излучателя для получения ультразвука частотой 1 МГц.

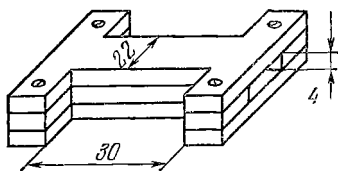


Рис. 32. Чертеж каркаса обмотки возбуждения.

приводит к уменьшению индуктивности обмотки возбуждения. А поскольку обмотка возбуждения одновременно является контурной катушкой генератора (см. рис. 28), это уменьшение индуктивности при настройке в резонанс должно быть компенсировано соответствующим увеличением емкости контурного конденсатора. Общий вид подготовленного к работе магнитострикционного излучателя изображен на рис. 33.

Для проверки излучателя следует, протерев вибратор спиртом (он должен быть совершенно чистым и сухим), ввести его внутрь каркаса обмотки возбуждения и привести поляризующие вибратор магниты в соприкосновение с его торцом или нижней излучающей плоскостью. На выступающую из каркаса обмотки возбуждения часть верхней излучающей плоскости нанесите каплю трансформаторного или подсолнечного масла. Подключите обмотку возбуждения

излучателя к генератору и конденсатором переменной емкости настройте генератор в резонанс с вибратором. При этом о нормальной работе излучателя свидетельствует характерное «вспучивание» масла на поверхности вибратора. Изготовив и проверив излучатель, отберите такие ферритовые стержни, которые дают ультразвук максимальной интенсивности.



Рис. 33. Внешний вид несимметричного магнитострикционного излучателя на частоту 1 МГц.

Выводы *a* обмотки возбуждения выполнены светлыми проводниками, вывод *б*—темным. Скручивать выводы между собой нежелательно.

В дальнейшем для определенности мы будем считать основную резонансную частоту ферритового вибратора толщиной 3 мм равной 1 МГц.

Магнитострикционные излучатели для получения ультразвука частотой до 15 МГц. Для получения ультразвука частотой выше 1 МГц необходимо собирать излучатели по симметричной схеме, изображенной на рис. 34: ферритовый вибратор *1* излучателя помещен внутрь двух отдельных секций обмотки возбуждения *2* и подмагничивается с торцов кольцевыми керамическими магнитами *3*.

Вибраторы излучателей, если их возбуждать на основной собственной частоте, должны иметь толщину, меньшую 3 мм. Такие вибраторы можно изготовить из стандартного ферритового стержня. Мы реко-

мендуем из одного стержня сразу изготовить несколько вибраторов.

Поверхность стекла смочите водой и посыпьте тонким слоем мелкого абразивного порошка (если не удастся достать абразив для шлифовки, можно приготовить абразивный порошок, стачивая его старым напильником с точильного круга; полученный таким способом абразив необходимо просеять через сито, чтобы удалить крупные зерна). Поместите ферритовый стержень марки М40ОНН толщиной 3 мм и площадью $20 \times 100 \text{ мм}^2$ на поверхность стекла с абразивом, прижмите его тремя пальцами правой

руки и начинайте шлифовку, производя рукой равномерные круговые движения по часовой стрелке. После 5 мин непрерывной шлифовки смените направление круговых движений и вновь продолжайте шлифовку в течение 5 мин. Затем переверните стержень другой стороной и повторите все операции. По мере срабатывания и высыхания абразива добавляйте новый и смачивайте его водой. При работе необходимо периодически поворачивать и переворачивать стержень так, чтобы шлифовка происходила равномерно. Только в этом случае получатся нужные для излучателей плоскопараллельные пластинки. Необходимая точность для вибраторов толщиной не менее 0,4 мм не очень высока: отклонение от плоскопараллельности вибраторов не должно превышать 0,01—0,02 мм; при правильной шлифовке это условие обычно выполняется автоматически. Вибраторы меньшей толщины, разумеется, потребуют большей точности изготовления. Плоскопараллельность обрабатываемых шлифовкой пластинок время от времени можно контролировать штангенциркулем или микрометром.

Предварительную шлифовку произведите до получения стержня толщиной около 1,5 мм. Затем смоченным водой ребром трехгранного напильника сделайте

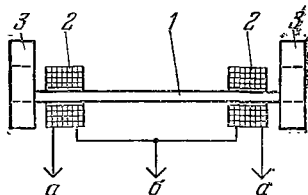


Рис. 34. Схема симметричных магнитострикционных излучателей для получения ультразвука частотой 1—15 МГц.

Предварительную шлифовку произведите до получения стержня толщиной около 1,5 мм. Затем смоченным водой ребром трехгранного напильника сделайте

надрез посередине стержня и разломите его пополам. Получившиеся пластинки более мелким абразивом сошлифуйте до толщины 0,6—1 мм. Одну из пластинок оставьте, а вторую разрежьте на три части размером примерно 15×20 мм². Из этих частей последующей шлифовкой изготовьте пластинки толщиной 0,4—0,5, 0,3 и 0,2 мм. Таким образом, из одного стандартного ферритового стержня вы получите четыре вибратора разной толщины.

Следует иметь в виду, что ферритовые стержни очень хрупки, и шлифовку тонких пластинок нужно производить с большой осторожностью, особенно следует остерегаться попадания крупных зерен между стеклом и пластинкой. Поэтому можно рекомендовать на первом этапе ограничиться изготовлением ферритового вибратора толщиной около 1 мм.

Начинающему шлифовка кажется весьма утомительной: работаешь, работаешь, а стержень все не стачивается! Возникает почти непреодолимое желание после нескольких движений вновь и вновь измерять толщину стержня, чтобы убедиться, что она уменьшается. Выход здесь один: поставив перед глазами часы, шлифовать 10 мин непрерывно. Затем измерить толщину стержня и, если она «не уменьшилась», шлифовать непрерывно 20 мин. Этот простой метод позволяет довольно быстро (за несколько часов) изготовить нужные вибраторы.

Прежде чем перейти к описанию конкретных конструкций высокочастотных излучателей, отметим их общие особенности.

Во всех излучателях, собранных по симметричной схеме, изображенной на рис. 34, секции обмотки возбуждения содержат одинаковое число витков и намотаны в одну сторону.

Для подмагничивания вибратора использованы кольцевые керамические магниты из школьного набора, содержащего такие магниты диаметрами 10, 15, 20, 25 и 35 мм и толщиной 5 и 7 мм. Магниты в тех излучателях, для которых это ниже специально не оговорено, касаются торцов вибратора и расположены согласно и перпендикулярно к вибратору, т. е. так, что векторы напряженности поля магнитов направлены в одну сторону параллельно излучающей

плоскости вибратора. Как уже отмечалось при описании несимметричного излучателя на частоту 1 МГц, направление напряженности подмагничивающего вибратора поля особого значения не имеет, и магниты могут быть расположены относительно вибратора как угодно, лишь бы величина поля была оптимальной для создания интенсивных ультразвуковых колебаний вибратора. Однако на практике удобно придерживаться какого-либо одного способа расположения магнитов, поэтому мы рекомендуем помещать их относительно вибратора всегда так, как показано на рис. 34. Поскольку во всех излучателях магниты расположены симметрично относительно вибратора, ниже при описании конкретных конструкций излучателей мы будем указывать лишь общее число магнитов.

Магнитострикционный излучатель на частоту 1 МГц, собранный по симметричной схеме, должен иметь обмотку возбуждения, состоящую из двух секций по 23—27 витков провода ПЭЛ 0,8—1,0 в каждой. Конструкция каркасов секций, которые лучше всего изготовить из двух текстолитовых планок, изображена на рис. 35. Секции обмотки возбуждения на панели излучателя следует закрепить так, чтобы была обеспечена возможность регулировки расстояния между ними в пределах 30—80 мм. В качестве вибратора излучателя можно использовать ферритовый стержень толщиной 3 мм и площадью от 20×50 до 20×100 мм². Имеющиеся в продаже ферритовые стержни, как правило, слегка изогнуты. Для увеличения интенсивности ультразвуковых колебаний стержень можно отшлифовать так, чтобы он стал плоскопараллельным. Подмагничивание вибратора осуществляется 2—4 кольцевыми керамическими магнитами диаметром 35 мм и толщиной 7 мм. Общий вид

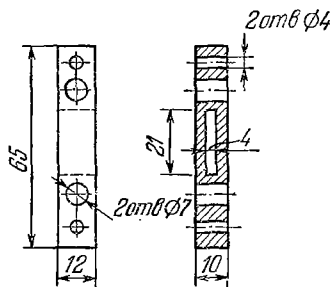


Рис. 35. Чертеж каркасов для секций обмотки возбуждения.

излучателя вместе с кюветой на его вибраторе изображен на рис. 36.

Для получения ультразвука частотой порядка 3 МГц в описанном выше излучателе следует возбуждать ферритовый вибратор толщиной 3 мм на третьей гармонике. Для этого необходимо перемотать обмотку возбуждения: она должна состоять из двух секций по 8—10 витков провода ПЭЛ 0,6—0,8 в каждой. Подмагничивание вибратора осуществляется двумя керамическими магнитами диаметром 35 мм и



Рис. 36. Внешний вид симметричного магнестрикционного излучателя на частоту 1 МГц.

На вибраторе излучателя расположена склеенная из оргстекла кювета с жидкостью.

толщиной 7 мм. При расстоянии между секциями обмотки возбуждения 30—80 мм площадь вибратора может быть любой в пределах от 20×50 до 20×100 мм².

В этом же излучателе при возбуждении на основной собственной частоте может быть использован ферритовый вибратор толщиной 1 мм и площадью 20×50 мм². Должна быть изменена только величина подмагничивающего вибратор поля: в излучателе нужно использовать два магнита диаметром 15 мм и толщиной 5 мм.

Возбуждение колебаний ферритового вибратора на гармониках выше третьей нецелесообразно: вибратор начинает сильно греться, в силу чего

излучатель работает не стабильно (наблюдается «уход» резонансной частоты и возникает необходимость постоянной подстройки генератора). Поэтому для получения ультразвука частотой выше 3 МГц следует использовать вибраторы толщиной меньше 3 мм.

На рис. 37 показан излучатель на частоту 5 МГц, предназначенный для введения в жидкость ультразвуковой волны через дно кюветы. Вибратором излучателя является ферритовая пластинка толщиной 0,6 мм и площадью $20 \times 50 \text{ мм}^2$. Обмотка возбуждения содержит две секции по 5 витков провода ПЭЛ

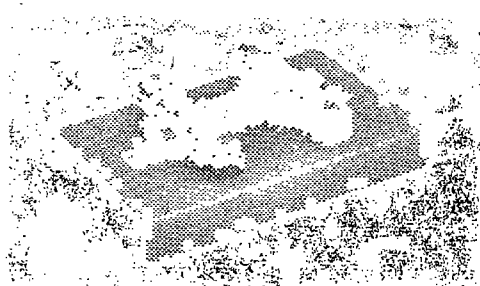


Рис. 37. Внешний вид магнестрикционного излучателя для получения ультразвука частотой 5 МГц.

0,5—0,7 в каждой. Конструкция каркасов для секций обмотки возбуждения остается прежней, слегка изменяются только их размеры. Расстояние между секциями составляет 30—40 мм. Подмагничивание вибратора осуществляется двумя керамическими магнитами диаметром 15 мм и толщиной 5 мм.

Магнестрикционный излучатель для получения ультразвука частотой около 8 МГц изображен на рис. 38. Каркас излучателя можно изготовить из оргстекла или винипласта. Излучатель предназначен для введения внутрь кюветы с жидкостью. Обмотка возбуждения излучателя содержит две секции по 3—4 витка провода ПЭЛ 0,5—0,6 в каждой. Вибратор толщиной 0,4 мм и площадью $15 \times 20 \text{ мм}^2$ поляризован двумя магнитами диаметром 10 мм и толщиной 5 мм.

Магнитострикционный излучатель для получения ультразвука частотой 12—15 МГц конструктивно не отличается от предыдущего. Обмотка возбуждения его должна содержать две секции по 2,5—3,5 витка

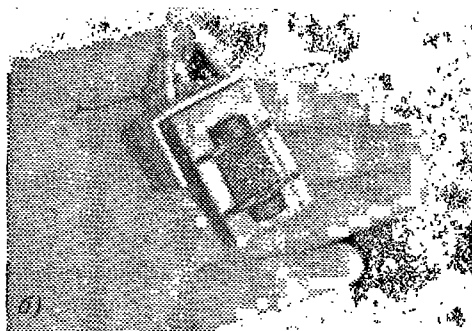
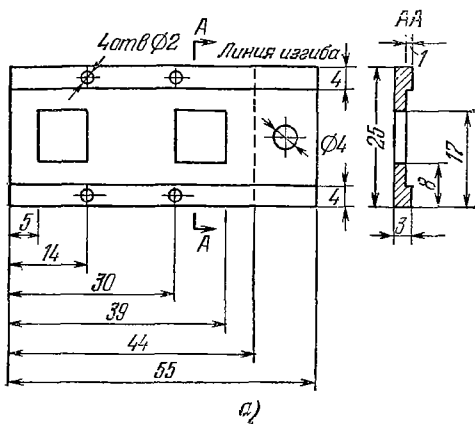


Рис. 38. Магнитострикционный излучатель для получения ультразвука частотой 8 МГц.

а — чертеж каркаса излучателя; б — внешний вид излучателя.

провода ПЭЛ 0,5—0,6 в каждой. Подмагничивающие вибратор два магнита диаметром 10 мм и толщиной 5 мм при согласном их расположении не должны касаться торцов вибратора; удобно между магнитами и вибратором установить резиновые прокладки толщиной 4—7 мм. В качестве вибратора может быть

использована ферритовая пластинка толщиной 0,2—0,25 мм и площадью 15×20 мм². Изготовить плоскопараллельную пластинку такой толщины с достаточно высокой точностью труднее, чем вибраторы ранее описанных излучателей. Нам кажется, что лучше отшлифовать слегка клиновидную пластинку. Интенсивность ультразвука, обеспечиваемого таким вибратором, естественно, снижается, зато появляется возможность поставить несколько интересных опытов.

В высокочастотных магнитострикционных излучателях ультразвука в качестве вибраторов используются радиотехнические ферритовые стержни, которые по прямому назначению применяются как сердечники магнитных антенн карманных радиоприемников. Можно высказать надежду, что если были бы разработаны специальные ферритовые вибраторы, то построенные на их основе магнитострикционные излучатели частотой несколько мегагерц вполне могли бы конкурировать с пьезоэлектрическими излучателями. Как знать, может быть и вам предстоит внести свой вклад в это важное и интересное дело! Во всяком случае, несомненно одно: высокочастотные магнитострикционные излучатели таят в себе еще много нераскрытых возможностей.

Как уже отмечалось выше, ультразвук и звук — это волны одной природы. Поэтому все основные явления акустики наблюдаются и в ультразвуковой области частот.

Действительно, звук и ультразвук *излучаются* источниками, которые в принципе одинаковы: это колеблющиеся тела, возбуждающие в окружающей среде упругую волну.

Звуковые и ультразвуковые волны *распространяются* с определенной (обычно постоянной) скоростью, зависящей от свойств окружающей источник среды.

При распространении ультразвуковые и звуковые волны *переносят энергию*, причем часть энергии «теряется» в среде, что приводит к *затуханию* волн.

Для ультразвуковых волн, так же как и для звуковых, существует явление *Допплера* — эффект изменения воспринимаемой приемником частоты волны при движении приемника или источника относительно среды.

Скорость звука в определенных условиях зависит от частоты. Это явление, называемое *дисперсией*, имеет место и в ультразвуковом диапазоне.

Переход звуковых и ультразвуковых волн из одной среды в другую сопровождается *отражением* и *преломлением* на границе раздела сред.

При наложении нескольких когерентных звуковых волн происходит явление *интерференции*. То же явление наблюдается и для ультразвука.

Если звуковая или ультразвуковая волна встречает на своем пути препятствие, она огибает его. Это явление называется *дифракцией* упругой волны.

Наконец, ультразвуковые и звуковые волны могут быть как *продольными* (в газах, жидкостях и твердых телах), так и *поперечными* (в твердых телах).

Перечень акустических явлений, протекающих одинаково в области звуковых и ультразвуковых частот, можно было бы значительно расширить и конкретизировать. Однако это вовсе не означает, что изучение ультразвука не дает ничего нового. Как раз напротив, существует обширный класс явлений, которые характерны только для ультразвука, и их с трудом можно (или вообще нельзя) обнаружить в области звуковых частот. Часть этих явлений принято объединять под общим названием эффектов второго порядка *). К ним относятся, например, радиационное давление, акустический ветер, ультразвуковой фонтан, притяжение между частицами в звуковом поле и т. д. Многие специфические явления ультраакустики не получили еще достаточно строгого теоретического объяснения.

Нетрудно понять, почему в области ультразвуковых частот должны наблюдаться явления, не имеющие места в звуковом диапазоне. Ультразвуковая волна, имея существенно бóльшую частоту, чем звуковая, обладает при той же амплитуде A и большей интенсивностью (см. формулу (11)). Высокочастотные колебания частиц среды значительной интенсивности, естественно, оказывают более сильное влияние на физические процессы, сопровождающие распространение ультразвука, чем слабые звуковые колебания. Именно этим объясняются многие явления ультраакустики.

Ниже описаны простые опыты с построенными вами ультразвуковыми генераторами и излучателями, позволяющие экспериментально изучить некоторые явления ультраакустики. Разумеется, здесь нельзя дать подробного описания всех интересных опытов. Однако, если вы поставите даже те, которые описаны ниже, то получите некое представление о том новом, что дало изучение ультразвука.

ВОЛНЫ НА БУМАГЕ

В опытах с магнитострикционным излучателем ультразвука вы уже доказали, что торец ферритового

*) Это название связано с порядком приближения, которое допускается при решении дифференциального уравнения, описывающего ультразвуковую волну.

вибратора колеблется. Теперь было бы неплохо воочию убедиться, что вибратор является источником ультразвуковой волны и она обладает теми же свойствами, что и любая другая.

Сделать это можно следующим образом. На мягкую подкладку, состоящую из нескольких слоев тонкой бумаги, поместите плотный бумажный лист белого цвета. На лист через марлевое сито тонким слоем равномерно насыпьте мелкий песок (лучше такой, который используется в песочных часах). Расположив излучатель под углом примерно 45° к горизонту, прикоснитесь концом его вибратора к центру листа бумаги и настройте ультразвуковой генератор в резонанс с вибратором. При этом песок на листе бумаги быстро перераспределится так, что станут видны круговые «волны» с центром в точке прикосновения вибратора (рис. 39). Опыт не удастся, если вибратор излучателя расположить вертикально. Для получения хорошей картины волн необходимо экспериментально подобрать подкладку и лист бумаги (его толщину и сорт).

Теория наблюдаемого в описанном опыте явления сложна, и поэтому мы ее рассматривать не будем. Здесь важно то, что в опыте непосредственно видно, что ферритовый вибратор излучателя является источником ультразвуковой волны, распространяющейся по поверхности и внутри бумажного листа. Песок по поверхности бумаги перераспределяется так, что обозначает линии равных фаз ультразвуковой волны.

Попробуйте установить некоторые физические свойства ультразвуковой волны на бумаге. Передвигайте излучатель, не отрывая торца его вибратора от бумажного листа. Вы заметите, как вместе с источником перемещается по бумаге и система круговых волн.

Пододвиньте вибратор ближе к краю листа. При этом песок на бумаге обозначит еще одну систему волн, отраженных от края.

Прорежьте в листе бумаги небольшое отверстие и расположите вблизи него вибратор излучателя. Вы увидите, что ультразвуковая волна частично отражается от препятствия и огибает его. Отсюда следует существование дифракции ультразвука.

Таким образом, описанные опыты и ряд других, которые можно самим придумать и поставить, убеждают в том, что магнитострикционный излучатель

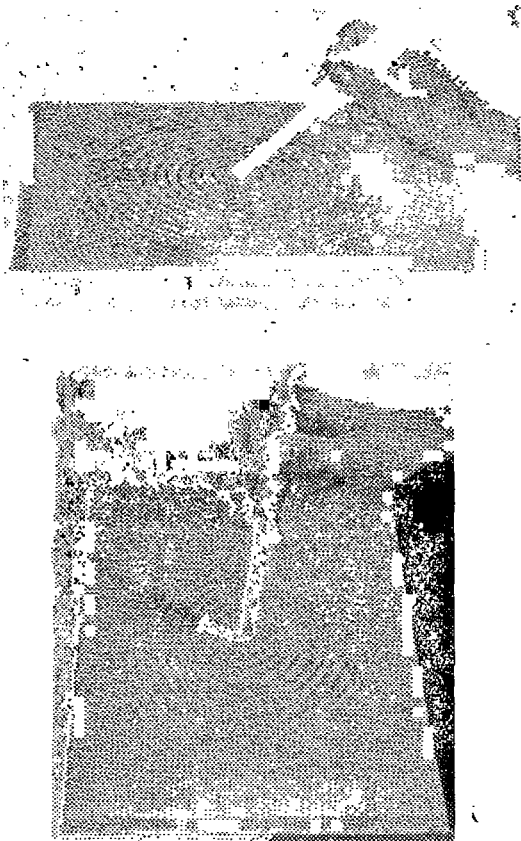


Рис. 39. Круговые волны на бумаге при разных наклонах вибратора.

Использованный в опыте песок был слегка желтоватым, и поэтому фотографии волн не контрастны.

действительно возбуждает в упругой среде ультразвуковую волну и эта волна обладает свойствами, аналогичными свойствам звуковых волн.

Опыты с волнами на бумаге можно продолжить. На установленный горизонтально плоский слой

поролон толщиной не менее 1 см положите лист плотной белой бумаги. Для успеха опытов очень важно подобрать подходящую бумагу (например, можно использовать лист толщиной 0,3 мм и размером 200×290 мм²). Равномерно посыпьте лист мелко раздробленными кристалликами марганцовокислого калия. Расположив излучатель вертикально, прикоснитесь торцом его вибратора к поверхности листа. Вы увидите, что кристаллики на поверхности листа будут интенсивно колебаться, однако никакой картины волн, подобной тем, которые вы наблюдали в предыдущих опытах, не образуется.

Результат опыта нетрудно объяснить: вертикально колеблющийся вибратор возбуждает в горизонтально расположенном листе поперечную бегущую волну (ее называют изгибной). Эта волна просто приводит в колебательное движение расположенные на листе кристаллики марганцовокислого калия, не перемещая их.

Теперь коснитесь вибратором листа вблизи его незакрепленного края. Вы сразу увидите появление характерной картины, обозначенной перераспределившимися кристалликами (рис. 40).

Попробуем объяснить результат опыта. Из предыдущего вы уже знаете, что ультразвуковая волна хорошо отражается на границе между твердым веществом и газом. В результате наложения падающей от вибратора и отраженной краем листа волн (обе волны, очевидно, когерентны) образуется интерференционная картина, представляющая собой распределение максимумов и минимумов интенсивности ультразвукового поля. Эта картина неподвижна, и поэтому легкий порошок сбрасывается с максимумов интенсивности, где лист колеблется со значительной амплитудой, и собирается в минимумах. В результате порошок обозначает распределение интенсивности в ультразвуковом поле (в опытах с наклонным излучателем получалось распределение линий равных фаз).

Внимательно рассмотрите получающуюся в опыте интерференционную картину. Вы видите, что кристаллики не собираются на самом краю листа. Это означает, что по краю листа проходит максимум ин-

тенсивности. Разность хода между волнами, идущими от излучателя к краю листа и отраженными от края, равна нулю. В самом деле, ведь можно представить себе, что отраженная волна испускается «мнимым» излучателем, являющимся зеркальным «изображением» действительного, отраженного от края как от

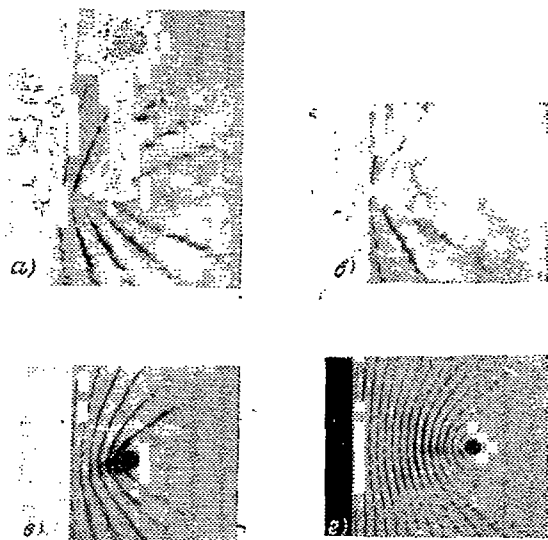


Рис. 40. Интерференция изгибных волн при отражении от края бумажного листа.

а—излучатель расположен перпендикулярно к плоскости листа; *б, в, г*—интерференционные картины при различных расстояниях от торца вибратора (обозначенного черным кружком) до края листа.

зеркала (т. е. расположенным симметрично ему относительно края листа). Два таких излучателя дают на краю листа максимум интенсивности, если они колеблются синфазно.

Таким образом, опыт показывает, что при отражении ультразвука от акустически менее плотной среды (среды с меньшим акустическим сопротивлением) фаза волны не меняется. Раньше при объяснении работы магнитострикционного излучателя мы использовали это положение без доказательства. Впрочем, уже опыты по резонансному возбуждению

магнитострикционного вибратора с достаточной убедительностью свидетельствуют в пользу этого положения.

Выясним, соответствует ли получающаяся в опыте интерференционная картина теоретическим выводам. Согласно теории интерференции волн минимумы интенсивности располагаются в точках, в которые волны от источников приходят с разностью хода, равной нечетному числу длин полуволин

$$\delta = \frac{1}{2}(2k + 1)\lambda, \quad k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

Геометрические места таких точек на плоскости представляют собой семейство гипербол, в фокусах которых расположены излучатели.

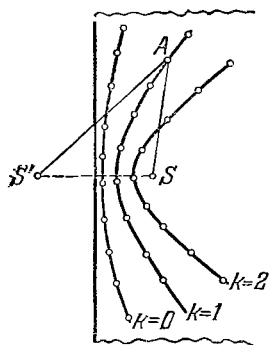


Рис. 41. К измерению разности хода между интерферирующими изгибными волнами.

Получите интерференционную картину при отражении изгибной ультразвуковой волны от края листа. Остро отточенным карандашом обозначьте на листе полученные линии минимумов интенсивности и положение торца излучателя. Убрав марганцовокислый калий, наложите лист бумаги на другой и иглой «переколите» экспериментальные точки, а карандашом отметьте положение края листа. Соединив точки плавными линиями, вы получите чертёж, подобный изображенному на рис. 41.

Нанесите на этот чертёж точку S' , симметричную относительно края листа точке S , в которой вибратор касается бумаги. Если предположение, что полученные в эксперименте линии суть гиперболы с фокусом в точке S , верно, то точка S' — второй фокус семейства гипербол. По определению гипербола — геометрическое место точек, разность расстояний которых от двух фокусов есть величина постоянная.

На любой из линий чертежа выберите произвольную точку. Измерьте расстояния от нее до точек S и S' и найдите разность этих расстояний. Теперь на

той же линии возьмите любую другую точку и для нее проделайте ту же операцию. Вы получите результат, в пределах ошибок опыта совпадающий с первым. Взяв еще несколько точек на выбранной линии, нетрудно убедиться, что эта линия действительно является гиперболой.

Подсчитайте разности расстояний от фокусов до точек, принадлежащих различным линиям чертежа. Вы заметите, что при переходе от первой линии ко второй эта разность увеличивается в три раза, от первой к третьей — в пять раз и т. д. Поэтому для разности расстояний можно записать экспериментальную формулу

$$\delta = (2k + 1)a, \quad k = 0, 1, 2, \dots,$$

где a — некоторая постоянная, имеющая размерность расстояния. Эта экспериментальная формула совпадает с приведенной выше теоретической, если положить, что постоянная a равна половине длины изгибной волны, распространяющейся в бумажном листе. Таким образом, результаты опыта полностью подтверждают теорию.

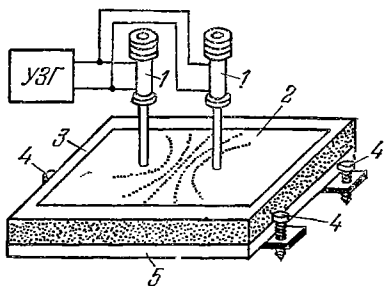


Рис. 42. Экспериментальная установка для изучения интерференции в бумажном листе изгибных волн, испускаемых двумя когерентными источниками.

1 — одинаковые магнитострикционные излучатели, 2 — лист плотной белой бумаги, 3 — слой парафина, 4 — регулировочные винты для горизонтальной установки, 5 — фанерное основание.

Задание 19. По измеренным в опыте значениям разности хода для определенного числа k (порядка интерференции) определите длину и скорость изгибной волны, распространяющейся в бумажном листе. Выясните, зависит ли длина волны от расстояния между излучателем и краем листа.

Задание 20. Выполняя задание 2, вы научились возбуждать продольные звуковые колебания в стеклянных трубках. Покажите, что изгибная волна в

бумажном листе, частота которой лежит в звуковом диапазоне, обладает теми же свойствами, что и волна ультразвуковой частоты.

Задание 21. Собрав установку, схематически изображенную на рис. 42, изучите интерференцию изгибных волн в листе бумаги, пользуясь двумя когерентными излучателями ультразвука. Установите, в фазе или противофазе колеблются вибраторы излучателей в ваших опытах.

ОРИЕНТИРУЮЩЕЕ ДЕЙСТВИЕ УЛЬТРАЗВУКА

Пусть в ультразвуковом поле диск расположен так, что его плоскость составляет некоторый угол с направлением распространения волны. Колеблющиеся частицы среды обтекают диск, меняя направление своего движения дважды за период ультразвуковой волны. При этом, как нетрудно видеть из рис. 43, возникают силы, создающие вращающий момент, который стремится повернуть диск перпендикулярно к направлению распространения волны.

Описанное явление было впервые подробно изучено выдающимся английским физиком Дж. В. Рэлеем. Теория показала, что если размеры диска малы по сравнению с длиной ультразвуковой волны, то сила, поворачивающая диск, пропорциональна интенсивности ультразвука. Таким образом, диск Рэлея может быть использован для измерений интенсивности ультразвука.

В настоящее время существуют гораздо более удобные и точные методы измерения силы звука, и поэтому диск Рэлея с этой целью практически не применяется. Однако сам эффект ориентации в ультразвуковом поле нередко используется для обнаружения ультразвука и даже для «проявления» ультразвуковых изображений.

Чтобы понять, как это делается, поставьте следующий опыт. В пробирке с ацетоном или керосином размещайте небольшое количество алюминиевой краски (ее часто называют «серебрянкой»). Магнито-стрикционный излучатель расположите вертикально на столе и на торец его вибратора нанесите каплю

воды или масла. Поместите дно пробирки в каплю на вибраторе и включите ультразвук (см. рис. 43, б). При этом вы увидите, как серая жидкость в пробирке просветлеет.

Прежде чем объяснить явление, разберемся, для чего нужна капля воды на торце вибратора. Если дно пробирки поместить на сухой вибратор, то ультразвуковая волна от излучателя пройдет в жидкость

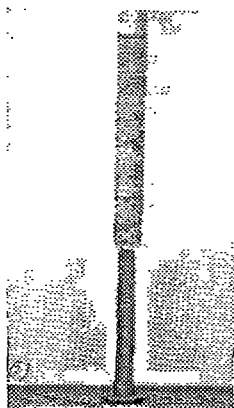
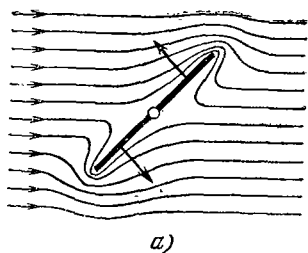


Рис 43. Опыт по ориентирующему действию ультразвука.

а—на диск Рэля, помещенный в ультразвуковое поле, действует вращающий момент, стремящийся повернуть его перпендикулярно к направлению распространения волны. б—в пробирке находится суспензия алюминиевой краски в ацетоне. Каждая взвешенная в ацетоне частичка этой краски представляет собой маленький диск Рэля.

только в тех местах, где есть хорошее соприкосновение между ферритом вибратора и стеклом пробирки. Там, где вибратор и пробирка разделены хотя бы тончайшей воздушной прослойкой, ультразвук не пройдет, поскольку он практически полностью отражается на границе феррит — воздух. Коэффициент отражения на границе, разделяющей твердое вещество и жидкость, значительно меньше, поэтому наличие капли жидкости между ферритом и стеклом приводит к увеличению интенсивности ультразвука в пробирке. Экспериментаторы в таких случаях говорят, что жидкость между вибратором и пробиркой улучшает «акустический контакт». Вы уже знакомы с

этим явлением по опытам, проделанным с магнито-стрикционным излучателем, вибратор которого находится на мокром столе.

Перейдем к объяснению результата опыта. Пробирка заполнена взвесью (суспензией) мельчайших частиц алюминия в ацетоне. Эти частицы представляют собой чешуйки, диаметр которых раз в 10—20 превосходит их толщину. Алюминиевые чешуйки ориентированы в жидкости совершенно беспорядочно, так что они рассеивают падающий на пробирку свет равномерно во всех направлениях. При прохождении ультразвука чешуйки, аналогично диску Рэлея, ориентируются перпендикулярно к направлению распространения волны. В результате все они отражают свет в одном направлении. Поэтому жидкость в пробирке кажется светлее.

Теперь уже нетрудно понять и то, как используется ориентирующее действие ультразвука для выявления («проявления» или, как говорят, визуализации) ультразвуковых изображений. Сами изображения создаются с помощью ультразвуковых линз или зеркал в специальной тонкой кювете. Кювета заполнена суспензией алюминиевых чешуек в подходящей жидкости (чаще всего, в ксилоле). Изображение, образованное ультразвуком в кювете, становится видимым непосредственно глазом благодаря тому, что ориентация чешуек выражена тем сильнее, чем интенсивнее ультразвук, а области с разной ориентацией чешуек по-разному рассеивают свет.

Задание 22. Из тонкой латунной фольги вырежьте диск диаметром около 5 мм. Диск с помощью небольшой расплавленной капельки олова или парафина укрепите на медной проволоке диаметром 0,05 мм, растянутой между концами изогнутой в виде рогатки толстой проволоки. Диск должен быть укреплен так, чтобы в воздухе от легкого дуновения он мог совершать крутильные колебания. Поместив изготовленный диск Рэлея в воду вблизи торца ферритового вибратора низкочастотного излучателя, еще раз докажите существование ориентирующего действия ультразвука.

СИЛЫ, ДЕЙСТВУЮЩИЕ НА ТЕЛА В УЛЬТРАЗВУКОВОМ ПОЛЕ

На концах двух тонких (диаметром около 0,05 мм) медных проволочек, пользуясь паяльником, сделайте из припоя два по возможности одинаковых шарика 1 диаметром 0,5—1 мм. На вибратор магнитострикционного излучателя 3 посередине наденьте резиновое колечко 5, а поверх него — небольшой отрезок резиновой трубки 4. В резиновую трубку вставьте стеклянную 2 внутренним диаметром 9—10 мм так, чтобы примерно половина вибратора находилась внутри

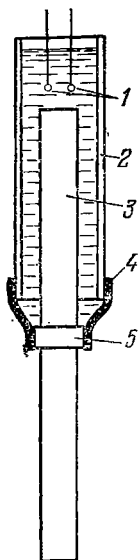


Рис. 44. К опыту, показывающему существование сил притяжения между шариками, помещенными в ультразвуковое поле.

Такое крепление вибратора магнитострикционного излучателя сделано с целью уменьшения потерь при введении ультразвуковой волны в жидкость.

колечко 5, а поверх него — небольшой отрезок резиновой трубки 4. В резиновую трубку вставьте стеклянную 2 внутренним диаметром 9—10 мм так, чтобы примерно половина вибратора находилась внутри

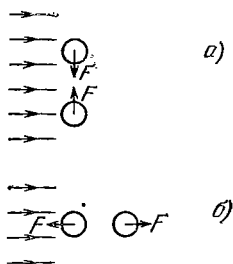


Рис. 45. Силы, действующие на шарик, находящийся в ультразвуковом поле.

трубки (рис. 44). Следите за тем, чтобы вибратор был закреплен только узким резиновым колечком и не касался стенок стеклянной трубки.

Расположив излучатель вертикально на столе, введите в каркас его обмотки возбуждения вибратор с закрепленной на нем стеклянной трубкой. В трубку до высоты 3—5 см от торца вибратора налейте воды. Опустите в воду заготовленные ранее шарик из

припоя и укрепите на спичке пластилином держащие их проволочки так, чтобы шарики находились на расстоянии около 5 мм от торца вибратора и не касались стенок трубки.

Включите ультразвуковой генератор и настройте его в резонанс с вибратором. При этом шарики немедленно сблизятся и коснутся друг друга. Если выключить ультразвук, шарики вновь займут исходное положение.

Из опыта со всей очевидностью следует, что между двумя шариками, помещенными на пути распространения ультразвуковой волны, действуют силы взаимного притяжения. Попробуем объяснить это интересное явление.

Когда шарики расположены так, что отрезок, соединяющий их центры, перпендикулярен к направлению распространения ультразвука (рис. 45, а), частицы жидкости, совершающие колебательное движение, в области между шариками движутся с большей скоростью, чем в остальном объеме жидкости. При этом по закону Бернулли давление в указанной области снижается. Поэтому на шарики действуют силы, стремящиеся их сблизить.

Если шарики расположить вдоль направления распространения ультразвука (см. рис. 45, б), то колебательная скорость частиц жидкости в области между шариками будет меньше, чем в окружающей их жидкости. Поэтому давление в промежутке между шариками возрастает, что приводит к возникновению сил отталкивания. Таким образом, силы, действующие между двумя частицами, находящимися в области распространения ультразвуковой волны, зависят от взаимного расположения частиц относительно фронта волны. Мы предоставляем вам самостоятельно продумать и поставить опыты, доказывающие это положение, а сейчас опишем еще один интересный эксперимент, иллюстрирующий возникновение сил в ультразвуковом поле.

В пробирку (или стакан) налейте воду и поместите на ее дно небольшие кусочки какого-либо немагнитного материала, например оргстекла. Прикоснитесь к кусочкам оргстекла торцом вибратора и убедитесь, что неработающий вибратор их не притя-

гивает. Включите ультразвуковой генератор и настройте его в резонанс с вибратором. Расположите излучатель так, чтобы его вибратор находился на расстоянии 1—2 мм от кусочка оргстекла. При этом вы увидите, что оргстекло подскочит и как бы прилипнет к торцу вибратора. Поднимая вибратор, вместе с ним можно поднять и оргстекло вплоть до поверхности воды (иногда удается вынуть вибратор с прилипшим к его торцу кусочком оргстекла даже в воздух). Опыт можно повторить с обрезками винипласта, алюминия и т. п. Это покажет вам, что — в первом приближении — эффект не зависит от материала кусочков.

Притяжение работающим вибратором объясняется тем, что среднее давление в ультразвуковом поле меньше, чем в невозмущенных частях жидкости. За кусочком любого материала ультразвуковая волна менее интенсивна, чем перед ним, и поэтому на кусочек действует сила, направленная к источнику ультразвука.

Задание 23. Поставьте опыт, доказывающий существование сил отталкивания между сферическими частицами, расположенными вдоль направления распространения ультразвуковой волны.

УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ВЕТЕР

При распространении ультразвуковой волны частицы среды колеблются около своих положений равновесия (если не учитывать беспорядочного теплового движения) и не перемещаются вместе с волной. Это свойство является одним из признаков волнового движения, при котором происходит перенос энергии, а не вещества.

Однако при включении мощного излучателя ультразвука частицы среды наряду с колебательным совершают и поступательное движение: в среде возникает течение, направленное от излучателя и имеющее скорость, много меньшую скорости звука. Такое движение частиц среды получило название ультразвукового ветра. Теория этого интересного явления не проста и еще далека от окончательного завершения. Поэтому

мы предлагаем вам опыты, позволяющие лишь убедиться в его существовании.

На расстоянии около 5 мм от пламени свечи расположите торец вибратора магнитострикционного излучателя. Включите ультразвуковой генератор и настройте его в резонанс с вибратором. При этом вы заметите отклонение пламени, обусловленное идущим от вибратора слабым потоком воздуха (рис. 46). Пламя свечи послужило здесь индикатором ультразвукового ветра.

Ультразвуковой ветер можно наблюдать и в жидкости. Чтобы подтвердить это, взболтайте в стакане с водой немного крахмала. Опустите в жидкость вибратор излучателя и подождите, пока суспензия крахмала не успокоится. Подайте в воду ультразвук. Вы увидите, что в жидкости постепенно установится медленное течение, как бы исходящее из торца вибратора.

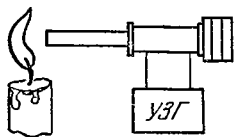


Рис. 46. К опыту, доказывающему существование ультразвукового ветра в воздухе.

Задание 24. Экспериментально покажите возможность существования ультразвукового ветра на поверхности жидкости.

Задание 25. При выполнении заданий 15 и 16 вы построили магнитострикционные излучатели без подмагничивания, ферритовые вибраторы которых имели длину 40—50 мм. Покажите, что такие излучатели дают более «сильный» ультразвуковой ветер, чем излучатели с вибраторами длиной около 160 мм. Попробуйте воспользоваться для обнаружения ультразвукового ветра легким сыпучим порошком (например, ликоподием), насыпанным перед торцом вибратора.

ФИГУРЫ ХЛАДНИ

Из оргстекла, эбонита, дюраля и т. п. толщиной 1—2 мм вырежьте круг диаметром 10—15 см. Положите круг на мягкую прокладку (в качестве которой лучше всего использовать поролон) и равномерно посыпьте его мелкими кристалликами какого-либо не

прилипающего к диску вещества. Если диск изготовлен из светлого материала, то в опытах удобно использовать марганцовокислый калий, если из темного — нашатырь, хлорноватокислый калий, сахарный песок.

Торцом вибратора расположенного вертикально магнитострикционного излучателя прикоснитесь к центру круга. Включите ультразвук. При этом кристаллики на поверхности диска сразу придут в движение и через несколько секунд обозначат концентрические круговые линии (рис. 47).

Из анализа ряда предыдущих опытов вы уже знаете, что частицы под действием ультразвуковых колебаний сбрасываются с пучностей и собираются в узлах. Таким образом, проделанный эксперимент показывает, что в круговой пластинке устанавливается стоячая волна.

Такая волна, очевидно, возникает благодаря интерференции падающей от излучателя и отраженной краем пластинки бегущих волн. Поскольку отражение происходит от акустически менее плотной среды, на краю должна образоваться пучность смещений стоячей волны. Эксперимент подтверждает это: первый узел отстоит от края пластинки на расстояние, равное половине промежутка между любыми соседними узлами. Так как расстояние между соседними узлами равно половине длины волны ультразвука в пластинке, то первый узел — в полном соответствии с теорией — образуется на расстоянии четверти длины волны от края пластинки.

Прикасайтесь вибратором к различным точкам посыпанного кристалликами круга. Вы увидите, что при этом каждый раз получают разные фигуры. Изготовьте треугольную, прямоугольную и т. д.

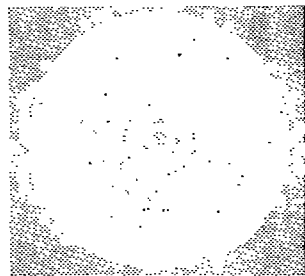


Рис. 47. Узловые линии при интерференции изгибных волн в круглой пластинке из эбонита.

Белым кружком обозначено место касания к пластинке торца вибратора. Перед включением ультразвука пластинка была равномерно посыпана мелко раздробленными кристалликами нашатыря.

пластинки. Все они при возбуждении ультразвуковых колебаний дают свои фигуры узловых линий (рис. 48).

Эти фигуры называются фигурами Хладни по имени выдающегося ученого — «отца акустики» — Хладни, впервые наблюдавшего их более полутора веков назад в опытах со звуковыми волнами в пластинках.

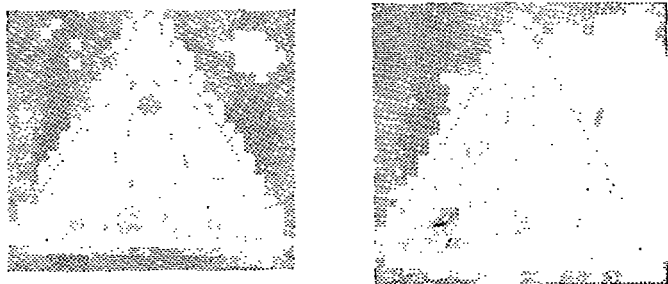


Рис. 48. Фигуры Хладни на треугольной эбонитовой пластинке. Белым кружком обозначено место касания к пластинке торца вибратора.

Теоретическое изучение распространения звука в пластинках показывает, что по пластинке распространяется изгибная волна, скорость которой определяется формулой

$$c_{\text{из}} = \frac{\pi d}{\lambda_{\text{из}}} \sqrt{\frac{k}{3\rho(1-\sigma^2)}} = \sqrt{\pi d f} \sqrt[4]{\frac{k}{3\rho(1-\sigma^2)}}, \quad (32)$$

где d — толщина пластинки, $\lambda_{\text{из}}$ — длина изгибной волны, f — ее частота, ρ — плотность материала пластинки, k — модуль упругости и σ — коэффициент поперечного сжатия. Изгибная волна возбуждается вибратором, колеблющимся в направлении, перпендикулярном к плоскости пластинки. Поэтому кажется вполне разумным допущение, что изгибная волна поперечна. Так мы и предполагали, рассматривая распространение изгибной волны в бумажном листе. На самом же деле, как показывают теория и эксперимент, изгибная волна одновременно и продольна, и поперечна (рис. 49).

Сравнив выражение (32) с формулой (24), нетрудно видеть, что скорость звука в пластинке, в отличие от скорости звука в стержне, зависит от ча-

стоты или длины изгибной волны. Такое явление, как уже отмечалось выше, называется дисперсией скорости звука.

Для каждой данной пластинки величина $\sqrt{\pi d} \sqrt[4]{\frac{k}{3\rho(1-\sigma^2)}}$ постоянна. Значит, формула (32)

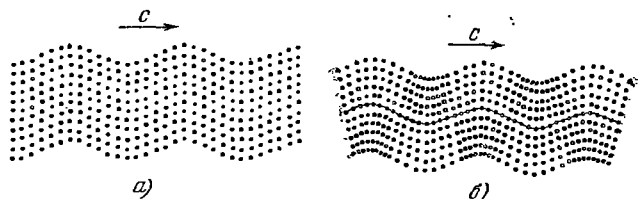


Рис. 49. Схематические изображения поперечной и изгибной волн.

а—в поперечной волне колебания частиц твердого тела происходят в направлении, строго перпендикулярном к направлению распространения волны. б—изгибная волна одновременно продольна и поперечна: частицы пластинки, по которой распространяется волна, совершают сложное колебательное движение, имеющее составляющие, перпендикулярные и параллельные к направлению распространения волны; чисто поперечная волна, как показывает схематический рисунок, распространяется только по среднему сечению пластинки.

утверждает, что скорость звука в пластинке пропорциональна корню квадратному из частоты. Этот дисперсионный закон можно записать следующим образом:

$$c_n \sim \sqrt{f}. \quad (33)$$

Поскольку $c_n = \lambda_n f$, отсюда (и из формулы (32)) следует, что

$$\lambda_n \sim 1/\sqrt{f}. \quad (34)$$

Длину изгибной волны в круглой пластинке, возбуждаемой ультразвуком в центре, очень просто определить: измерьте расстояние между соседними узлами хладниевой картины и вы получите значение половины нужной величины. Частоту ультразвука можно изменять, применяя в излучателе вибраторы разных длин. Основная собственная частота вибратора длиной l по формуле (18) равна

$$f = c/2l,$$

где c — скорость звука в феррите. Подставляя это значение частоты в формулу (34), получаем, что

$$\lambda_n \sim \sqrt{l}. \quad (35)$$

Таким образом, если вы экспериментально покажете, что длина волны в пластинке пропорциональна корню квадратному из длины вибратора, используемого для получения изгибной волны в этой пластинке, то тем самым вы докажете справедливость формулы (33) и одновременно убедитесь в существовании дисперсии для изгибных волн.

Изготовьте ферритовые вибраторы длиной 50, 80, 120, 160 мм и ими возбуждайте колебания в центре одной и той же круглой пластинки. Измерьте соответствующие разным частотам длины изгибных волн. Чтобы повысить точность измерений, вы можете вначале найти расстояние между несколькими (например, десятью) узловыми линиями, а затем поделить его на число промежутков между узлами и умножить на два. Результаты измерений занесите в таблицу.

Далее обработайте полученные результаты непосредственных измерений. Формулу (35) можно переписать в виде $\lambda_n = a \sqrt{l}$, где a — какой-то коэффициент. Чтобы избавиться от него, поделите все значения длины вибратора и длины изгибной волны на наибольшие l_m и λ_{nm} . По полученным данным нанесите в декартовой системе координат точки, соответствующие экспериментальным результатам. Теперь вычислите значения $\sqrt{l/l_m}$ и постройте в той же системе координат график функции $y = \sqrt{l/l_m}$. Вы обнаружите, что экспериментальные точки неплохо ложатся на теоретически построенный график. Тем самым вы доказали справедливость формулы (35), а значит, и формулы (33).

Внимательно проанализируйте все рассуждения. Убеждены ли вы в том, что экспериментально подтвердили справедливость теории? Во всяком случае, вы должны хорошо представлять себе главное, что сделали: доказали, что скорость звука в пластинке пропорциональна корню квадратному из частоты.

Задание 26. Получите фигуры Хладни на диске толщиной 1—2 мм, вырезанном из текстолита. Если вибратор касается диска в центре, то получается картина узловых линий, подобная приведенной на рис. 50. Сравните результат опыта с теми, которые вы наблюдали при использовании дисков из алюминия и оргстекла. Дайте объяснение явлению.

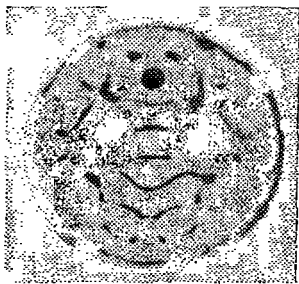
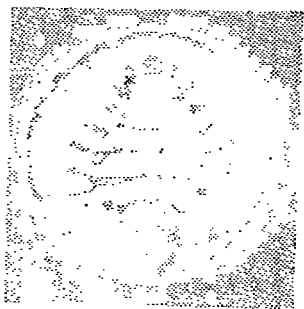
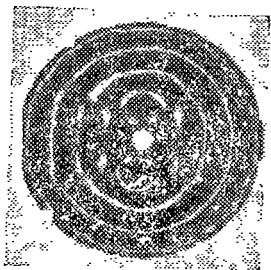


Рис. 50. Фигуры Хладни на круглой пластинке из текстолита, колебания которой возбуждаются в разных точках.

Задание 27. Попробуйте получить фигуры Хладни в звуковом диапазоне частот, возбуждая пластинки колеблющейся стеклянной трубкой (см. задание 2). Существует ли явление дисперсии изгибных волн в звуковом диапазоне частот?

Задание 28. В генераторе, предназначенном для получения ультразвука средней частоты (см. рис. 22), замените контурный конденсатор постоянной емкости СЗ школьным демонстрационным конденсатором

переменной емкости. К выходу генератора подключите магнитострикционный излучатель, состоящий из ферритового вибратора длиной 15—20 мм, свободно расположенного на магнитах (см. рис. 26). На верхний торец вибратора аккуратно нанесите каплю воды, в которой взвешено небольшое количество крахмала. Включите генератор и конденсатором переменной емкости изменяйте частоту электрических колебаний. Изучите происходящие при этом явления.

Задание 29. На рабочую поверхность ферритового вибратора магнитострикционного излучателя, обеспечивающего получение ультразвука частотой 1 МГц (см. рис. 33), нанесите каплю воды со взвешенным в ней крахмалом. Настройте генератор в резонанс с вибратором. Что вы при этом наблюдаете? Сделайте из опыта соответствующий вывод.

СТОЯЧАЯ УЛЬТРАЗВУКОВАЯ ВОЛНА В ВОЗДУХЕ

Еще в прошлом веке немецкий физик Кундт поставил первые опыты со стоячей звуковой волной в газах. В опытах он использовал горизонтально расположенную стеклянную трубку, в которой тонким слоем равномерно были насыпаны мелкие (пробковые) опилки. В один конец трубки был введен звуковой излучатель — закрепленный посередине стеклянный стержень, продольные колебания которого возбуждались трением. В другой конец трубки свободно входил поршень — отражатель. Изменяя положение отражателя, можно было добиться того, чтобы между излучателем и отражателем устанавливалась стоячая волна. При этом порошок в трубке собирался в кучки, обозначая узлы смещений стоячей волны. По известной частоте звука и измеренной в опыте длине волны можно было определять скорость звука в газе, заполняющем трубку.

Опыты Кундта нетрудно повторить, пользуясь магнитострикционным излучателем ультразвука низкой частоты. Подберите стеклянную трубку длиной 100—150 мм и внутренним диаметром 8—9 мм. Лучше всего использовать для опытов такую трубку, в которую вибратор входит с минимальным зазором. На концы трубки наденьте резиновые колечки и с по-

мощью жестяных или пластмассовых скобочек укрепите трубку на каком-либо основании (рис. 51).

В трубку равномерным тонким слоем насыпьте легкий сыпучий порошок (например, ликоподий или порошок зубопротезной пластмассы «Протакрил»). Сделать это удобно, пользуясь жестяным желобком, который вместе с насыпанным на него порошком вводится в трубку, а затем переворачивается и удаляется из нее. В один конец трубки введите торец вибратора магнитострикционного излучателя, а в другой — отражатель, в качестве которого можно использовать небольшой обломок ферритового стержня.

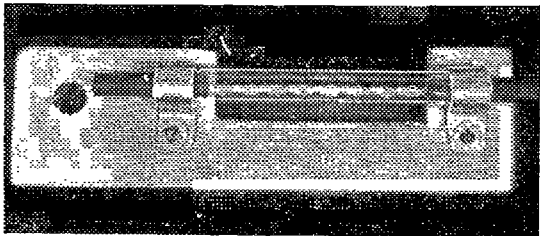


Рис. 51. Прибор для наблюдения стоячей ультразвуковой волны в трубке Кундта.

В одно отверстие стеклянной трубки введен отражатель (отрезок ферритового стержня), в другое — вибратор низкочастотного магнитострикционного излучателя.

Вибратор в каркасе обмотки возбуждения лучше не закреплять. В этом случае нерабочий торец его слегка выйдет из каркаса обмотки и вы сможете поместить на него лезвие бритвы, необходимое для индикации настройки генератора в резонанс с вибратором. Подключите излучатель к ультразвуковому генератору и произведите настройку прибора. Осторожно перемещайте отражатель по трубке. Вы обнаружите, что при определенных положениях отражателя в трубке устанавливается стоячая волна: порошок собирается в узлах этой волны, отстоящих друг от друга на одинаковые расстояния (рис. 52).

Помимо кучек порошка в узлах, в опыте вы заметите тонкие пленки, причем пленки наибольшей высоты окажутся расположенными в пучностях

смещений стоячей волны. Чем объясняется эта своеобразная ребристая структура распределения порошка в трубке Кундта?

Вспомните о силах, действующих в ультразвуковом поле на две расположенные рядом сферические частицы. Эти силы стремятся сблизить частицы, если отрезок, соединяющий их центры, ориентирован перпендикулярно к направлению распространения волны, и удалить их друг от друга, если частицы расположены вдоль направления распространения ультразвука. Совокупность таких сил, действующих на многие частицы порошка, приводит, как нетрудно

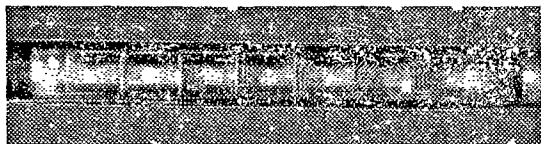


Рис. 52. Стоячая ультразвуковая волна в трубке Кундта.

Слева в трубку введен отражатель, справа — вибратор излучателя. В пучностях смещений стоячей волны образуются пылевые пленки. Ближайшая к отражателю пучность смещений отстоит от него на четверть длины волны.

сообразить, к образованию тонких пылевых слоев, ориентированных поперек трубки. Возникновение самих сил обусловлено обтеканием частиц переменным потоком воздуха. Но этот поток имеет максимальную скорость в пучностях смещений, а в узлах стоячей волны воздух практически неподвижен. Поэтому пленки в узлах не образуются, а в пучностях они имеют максимальную высоту (если вы достаточно тщательно подберете внутренний диаметр трубки Кундта по диаметру вибратора, то сумеете получить в пучностях стоячей волны пленки, почти полностью перекрывающие трубку). Изученное вами явление наблюдается только при значительных интенсивностях звуковой волны, и поэтому его относят к эффектам второго порядка.

Экспериментально определите скорость звука в воздухе. Для этого измерьте расстояние между 10—15 узлами и, разделив его на число промежутков между узлами, определите значение половины длины

волны звука в воздухе. Если у вас под рукой есть штангенциркуль, то вы можете получить более точные результаты, измеряя расстояние не между узлами, а между пучностями стоячей волны, обозначенными тонкими пленками. Далее, зная частоту ультразвукового генератора (а если она вам неизвестна, ее всегда можно найти, измерив длину ферритового вибратора), по формуле $c = \lambda f$ вычислите скорость звука в воздухе. Обычно в этом опыте получаются значения скорости, близкие к 340 м/с.

Советуем повторить описанный опыт с вибраторами разной длины и затем обработать результаты измерений так, как вы поступали при изучении распространения изгибающей волны в пластинках. Анализ этой серии экспериментов покажет, что в исследованной вами области частот дисперсия звука в воздушной среде практически отсутствует.

Еще раз внимательно наблюдайте стоячую волну в трубке Кундта. Передвигая отражатель, вы заметите, что порошок сдувается с узлов. Объясняется это явление, по-видимому, наличием ультразвукового ветра.

Ближайшая к отражателю пучность отстоит от него на расстояние, равное половине расстояния между любыми соседними пучностями или узлами, т. е. на расстояние четверти длины ультразвуковой волны. Следовательно, в плоскости отражателя расположен узел смещений стоячей волны. Но в этой плоскости интерферируют две волны (падающая на отражатель и отраженная им), имеющие разность хода, равную нулю. Согласно теории интерференции в точках, где разность хода между волнами равна нулю, расположен максимум интенсивности интерференционной картины, а у вас в опыте получается узел, т. е. минимум. Такой результат можно объяснить только тем, что при отражении звука от акустически более плотной среды фаза волны меняется на π или, как говорят, происходит потеря полуволны. Сопоставьте результат этого наблюдения с тем, что вы обнаружили, делая опыты по интерференции ультразвуковых волн, в бумажном листе и в пластинках. Сделайте соответствующие выводы.

Исчерпывают ли описанные опыты и наблюдения те явления, которые можно обнаружить, следя за поведением порошка в трубке Кундта? Конечно, нет. Совершенно невозможно дать полное описание явлений, происходящих даже в столь ограниченной области, как трубка Кундта. Вы должны это иметь в виду, и поэтому рассчитывать в своей работе больше всего на самих себя. Будет прекрасно, если для себя вы откроете новое явление там, где, казалось бы, уже все известно. Пусть вначале вам не удастся объяснить его. Но есть книги, библиотеки, вы учитесь, и то, что пока не совсем ясно, станет постепенно понятным.

Будет гораздо хуже, если вы пройдете мимо чего-то необычного, не обратите на него внимания, не запишете условий, в которых вы заметили это необычное, посчитаете его ошибкой, потому что в книжке ничего об этом не говорится. Действуя так, можно упустить многое.

Тем, кому все это кажется недостаточно убедительным, кто думает, что, сделав описанное, он сделал все возможное, мы советуем вообще убрать из трубки Кундта отражатель. Получится ли в таком случае стоячая волна? Если она получилась, то откуда берется необходимая для ее образования отраженная волна? И в трубке, и вне ее воздух, разве может в воздухе от воздуха отражаться звук? А что находится рядом с открытым концом: пучность или узел смещений стоячей волны? А что должно там находиться по теории?

Видите, все не так просто. Опыты можно разнообразить бесконечно, и результаты каждого из них достойны изучения.

Попробуйте заменить порошок в трубке Кундта жидкостью, например водой. Для этого вам придется закрыть один конец трубки герметически: введите в трубку отражатель, обмотайте его и конец трубки высоковольтной изоляцией и закрутите вокруг места соединения проволоку. Теперь, чтобы получить стоячую волну, нужно передвигать трубку вместе с закрепленным в ней отражателем относительно вибратора магнитострикционного излучателя.

Включив ультразвуковой генератор и настроив его в резонанс с вибратором, получите в трубке стоячую волну. Вы обнаружите, что налитый в трубку слой воды примет вид «застывшей» волны.

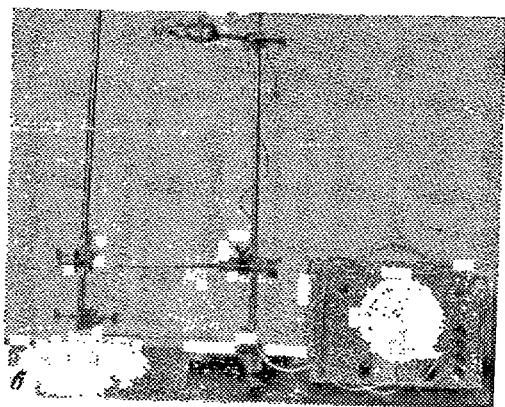
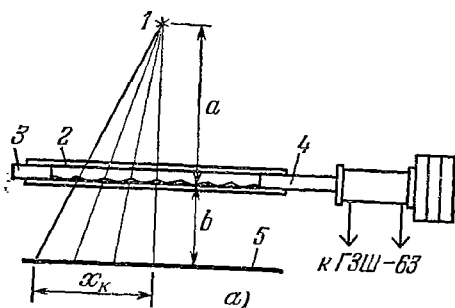


Рис. 53. К определению длины ультразвуковой волны в трубке Кундта с помощью жидкости.

Схема установки (а) и ее внешний вид (б). 1—линейный источник света, 2—трубка Кундта с тонким слоем воды, 3—отражатель, 4—вибратор излучателя, 5—белый экран, на котором получают изображения источника.

Результат опыта объясняется тем, что вода периодически выжимается из пучностей давлений стоячей волны, возникающей в трубке Кундта, и поднимается в узлах давлений. Пучности давлений совпадают с узлами смещений стоячей волны. Поэтому, если вы будете внимательны, то увидите, что уровень воды в

трубке ниже в тех местах, где в предшествующих опытах собирались кучки порошка.

Места, в которых жидкость вспучивается, могут действовать подобно собирающим линзам. Если над трубкой Кундта расположить лампу, прямая нить которой перпендикулярна к трубке, то вспучивания жидкости могут дать изображения нити лампы на помещенном под трубкой экране. Полученные изображения очень резки и позволяют с большой точностью измерить расстояние между пучностями стоячей волны в газе, заполняющем трубку.

Схема и общий вид установки для определения описанным способом длины звуковой волны в воздухе изображены на рис. 53. На двух штативах закрепите лампочку карманного фонаря, трубку Кундта с герметически закрывающим ее отверстие отражателем, магнитострикционный излучатель с ферритовым вибратором длиной 140—160 мм и белый экран. Лампочка должна располагаться на расстоянии около 0,5 м от трубки, а ее нить должна быть перпендикулярна к трубке. Белый экран представляет собой фанерное основание, на котором кнопками закреплена полоска бумаги. Экран должен быть расположен так, чтобы можно было изменять в пределах 5—20 см расстояние между ним и трубкой Кундта. Для работы можно изготовить и более удобный прибор, общий вид которого изображен на рис. 54.

Нетрудно видеть (см. рис. 53), что, измерив расстояние a от источника света до слоя жидкости, расстояние b от слоя до экрана и расстояние x_k между k -м и $(k + 1)$ -м изображениями источника, по формуле

$$\lambda = \frac{2a}{a + b} \frac{x_k}{k}, \quad k = 1, 2, \dots, \quad (36)$$

можно найти длину волны звука.

Чтобы получить на экране изображения источника, созданные вспучиваниями жидкости в трубке Кундта, нужно подобрать оптимальное расстояние между экраном и трубкой. Свет, отраженный от стенок трубки, при этом, как правило, не мешает ни наблюдениям, ни измерениям. Положение изображений на экране можно отметить остро отточенным карандашом или

иглой. Затем экран можно снять и измерить штангенциркулем расстояние x_k .

Задание 30. Повторите опыт по образованию пылевых фигур Кундта в трубке, пользуясь магнито-стрикционным излучателем, подключенным к ламповому генератору, который питается от источника переменного тока (см. рис. 22). При этом порошок в



Рис. 54. Прибор для наблюдения стоячей ультразвуковой волны с помощью жидкости в трубке Кундта.

трубке перераспределится, как показано на рис. 55. Сравните результат опыта с тем, что получается при

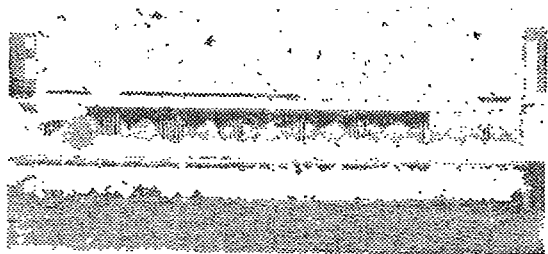


Рис. 55. Пылевые фигуры Кундта при использовании модулированной ультразвуковой волны.

использовании немодулированной ультразвуковой волны. Попробуйте объяснить явление.

Задание 31. Сделайте трубку Кундта покороче, длиной всего 5—8 см. Закрыв герметически один

конец трубки отражателем, налейте в нее немного спирта или ацетона и получите, как описано выше, стоячую волну в воздухе, заполняющем трубку. Постепенно повышайте интенсивность ультразвука, настраивая более точно генератор в резонанс с вибратором. Что вы при этом наблюдаете?

СТОЯЧАЯ УЛЬТРАЗВУКОВАЯ ВОЛНА В ЖИДКОСТИ

Метод получения стоячей волны часто используется для измерения скорости звука в различных жидкостях. Поэтому, несмотря на то, что вы достаточно подробно изучили стоячую ультразвуковую волну в твердых телах и газах, вам будет бесполезно познакомиться и со стоячей волной в жидкостях.

Наблюдать непосредственно глазом стоячую волну в жидкостях можно, если воспользоваться ориентирующим действием ультразвука. В стеклянную трубку внутренним диаметром 3—6 мм, один конец которой предварительно запаян на пламени газовой горелки или сухого горючего, налейте суспензию алюминиевой краски в ацетоне. Трубку запаянным концом поместите в каплю воды, находящуюся на торце вибратора расположенного вертикально магнестрикционного излучателя. Настраивая генератор в резонанс с вибратором так, чтобы получился ультразвук сравнительно небольшой интенсивности, следите за содержимым трубки. Если вы удачно подобрали интенсивность ультразвука (при большой интенсивности наблюдается сильный акустический ветер) и высоту столба жидкости в трубке, у вас образуется стоячая волна, которую можно видеть благодаря периодическим просветлениям вдоль трубки суспензии алюминиевой краски в ацетоне. Опыт требует тщательности и определенного экспериментального искусства. Гораздо чаще вместо того, что нужно, вы будете наблюдать уже знакомое вам просветление всего столба жидкости.

Результат опыта объясняется тем, что алюминиевые чешуйки в пучностях стоячей волны поворачиваются перпендикулярно к оси трубки, а в узлах они ориентированы самым беспорядочным образом. Поэтому узлы и пучности по-разному рассеивают свет

и в силу этого становятся видимыми непосредственно глазом.

Держать трубку в капле воды на торце вибратора трудно: вибратор колеблется, и трубка часто соскальзывает с него. Чтобы облегчить работу, укрепите вибратор резиновыми колечками в стеклянной трубке, а к ней пластилином прикрепите небольшую баночку из пластмассы или алюминия (рис. 56). В баночку

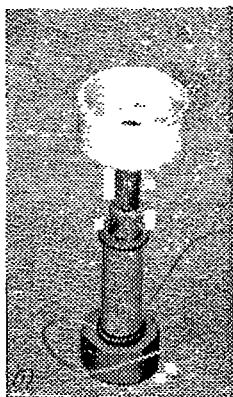
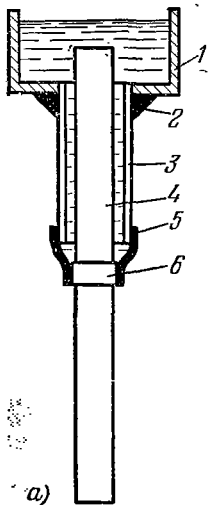


Рис. 56. Способ введения ультразвука в жидкость, заполняющую баночку (а), и общий вид применяемого прибора (б).

1—баночка (ее можно изготовить из пластмассовой упаковки, в которой продают закрепитель), 2—пластилин, 3—стеклянная трубка, 4—ферритовый вибратор излучателя, 5—резиновая трубка, 6—резиновое колечко, расположенное посередине вибратора.

налейте воды и трубку с суспензией поместите запаянным концом в воду так, чтобы расстояние между ним и торцом вибратора составляло 0,5—2 мм.

Вместо того чтобы запаявать конец трубки, можно затянуть его тонкой резиновой пленкой от детского надувного шарика.

Интересно поставить аналогичные опыты, пользуясь вместо трубки обычной стеклянной пробиркой. Экспериментируя, вы заметите, что иногда в пробирке образуется стоячая волна, соседние пучности

которой отстоят друг от друга на расстояние, много меньше ожидаемого согласно расчету (рис. 57). Это

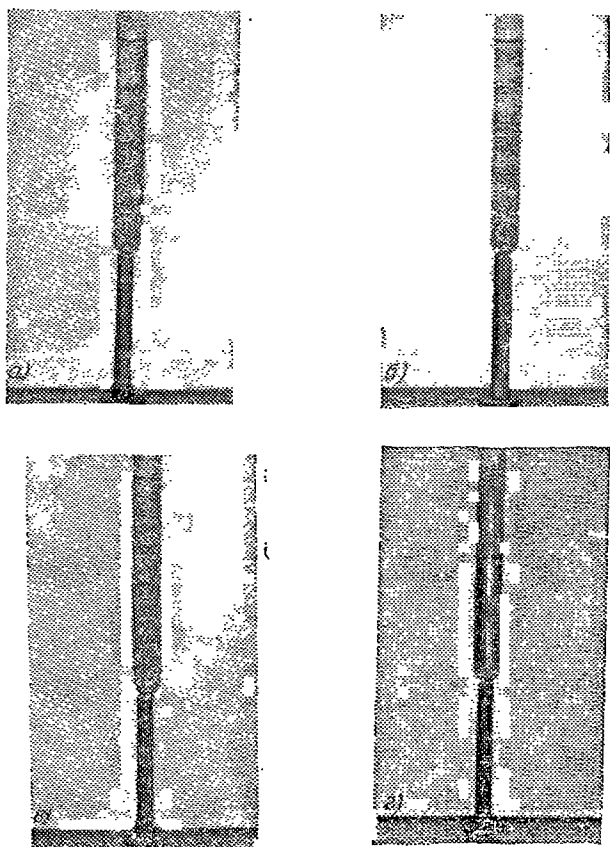


Рис. 57. Стоячие ультразвуковые волны в пробирке, заполненной суспензией алюминиевой краски в ацетоне.

Пробирка верхним концом закреплена в лапке штатива, а дном касается торца ферритового вибратора (на вибратор нанесена капля подсолнечного масла). Все картины стоячей волны, представленные на фотографиях, получены в одних условиях; слегка только изменилось усилие, прижимающее пробирку к вибратору.

удивительно, поскольку условия опыта, казалось бы, совершенно не меняются и, в частности, частота ультразвука остается прежней. Объясняется наблюден-

ное вами замечательное явление тем, что ультразвуковая волна распространяется не только в жидкости, но и по стеклу пробирки. При этом пробирка совершает поперечные радиальные колебания, что и приводит к возникновению в жидкости волны иной длины, чем у обычной продольной.

Еще один впечатляющий вариант описанных опытов заключается в следующем. В торце ферритового вибратора смоченным водой острым углом напильника сделайте небольшое сферическое углубление. Расположив низкочастотный магнитострикционный излучатель вертикально на столе, в лапке штатива над

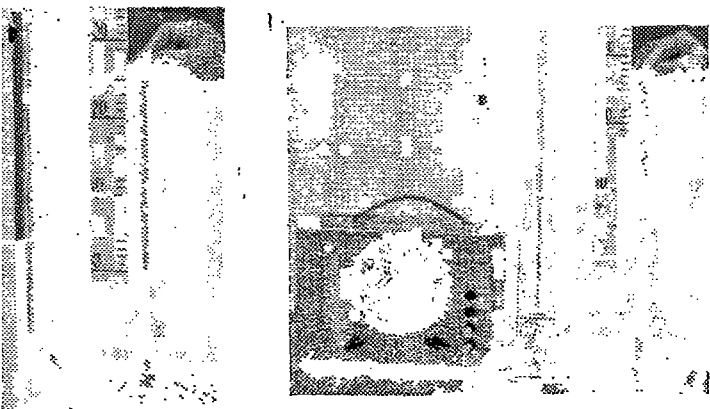


Рис. 58. Стоячая волна в длинной пробирке, заполненной суспензией алюминиевой краски в ацетоне.

а — до начала облучения; *б* — после включения ультразвука. Верхняя область, в которой чешуйки алюминиевой краски ориентированы беспорядочно, отстоит на четверть длины волны от свободной поверхности жидкости в пробирке, а нижняя — на половину от торца излучателя (дна пробирки). Таким образом, опыт убедительно показывает, что ориентирующее действие ультразвука наблюдается в пучностях смещений стоячей волны (им соответствуют прозрачные участки жидкости на фотографии).

ним закрепите длинную пробирку с суспензией алюминиевой краски в ацетоне. Рукой прижмите дно пробирки к торцу вибратора (для успеха опыта необходимо подобрать оптимальное давление) и включите ультразвук. Вы увидите прекрасную стоячую волну в пробирке (рис. 58).

Наблюдения показывают, что описанным методом длину ультразвуковой волны в жидкости можно

измерить с гораздо меньшей точностью, чем в воздухе или твердом теле: узлы и пучности стоячей волны, видимые благодаря различной ориентации алюминиевых чешуек, сильно «размазаны». Однако существует значительно более точный метод индикации узлов и пучностей стоячей волны в жидкостях, чем рассмотренный выше. Этот метод используется в специальных приборах, которые называют ультразвуковыми интерферометрами.

Собрать модель ультразвукового интерферометра совсем несложно. Укрепленной в лапке универсального штатива струбциной зажмите резиновую грушу. Грушу резиновым патрубком соедините со стеклянной трубкой внутренним диаметром 8 мм и длиной 30—40 см. На трубке с помощью обжимок из жести или винипласта закрепите линейку. Трубку зафиксируйте вертикально в еще одной лапке штатива. Под нижний конец стеклянной трубки подведите магнитострикционный излучатель с укрепленной на его вибраторе чашечкой (см. рис. 56, б). В чашечку налейте дистиллированную или прокипяченную воду и, вращая зажимной винт струбцины, поднимите столб воды в трубке.

Включите ультразвуковой генератор и настройте его в резонанс с вибратором. О точности настройки вы можете судить по громкости шипящего звука (так называемого кавитационного шума). Медленно вращайте винт струбцины, изменяя высоту столба воды над вибратором магнитострикционного излучателя. При этом через равные изменения высоты столба жидкости вы будете слышать усиление и ослабление кавитационного шума.

При объяснении описанного выше явления разумно предположить, что изменение высоты столба жидкости приводит к систематическому возникновению и исчезновению стоячей ультразвуковой волны, подобно тому, как это имело место при перемещении отражателя в трубке Кундта. Совершенно очевидно, что интенсивность колебаний вибратора излучателя зависит от того, есть ли стоячая волна в трубке или ее нет. Если бы такой зависимости не существовало, то было бы трудно объяснить связь высоты столба жидкости с громкостью кавитационного шума. Таким образом,

из опыта следует, что само появление стоячей волны в столбе жидкости над вибратором оказывает воздействие на излучатель: амплитуда колебаний вибратора меняется в зависимости от того, приводит ли его работа к образованию стоячей волны или нет.

Но изменение интенсивности колебаний вибратора, естественно, должно приводить к изменению мощности, потребляемой излучателем от генератора. В свою очередь эти изменения неизбежно должны влиять на величину постоянного тока, проходящего от выпрямителя по транзисторному генератору. Колебания тока, вызванные реакцией излучателя на стоячую волну, незначительны по сравнению с полным током,

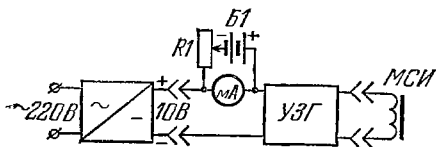


Рис. 59. Блок-схема электрической части ультразвукового интерферометра.

проходящим через генератор. Поэтому для их обнаружения используют специальную схему компенсации (рис. 59), состоящую из постороннего источника питания, переменного резистора и миллиамперметра.

Разберемся в работе этой схемы. Электрический ток от выпрямителя проходит к ультразвуковому генератору через миллиамперметр. Параллельно последнему прибору подключены последовательно соединенные батарея и переменный резистор. Полярность батареи выбрана так, что создаваемый ею в миллиамперметре ток направлен противоположно току, идущему через тот же миллиамперметр от выпрямителя. Меняя сопротивление резистора, можно добиться равенства по абсолютной величине токов, проходящих через миллиамперметр. Поскольку рассматриваемые токи имеют противоположные направления, общий ток, протекающий через прибор, будет равен нулю. Таким образом, схема позволяет скомпенсировать значительный по величине постоянный ток, который потребляется от источника питания ультразвуковым

генератором, и, следовательно, наблюдать небольшие изменения этого тока, вызванные реакцией излучателя.

Для проведения эксперимента удобно использовать отдельный источник питания и ультразвуковой генератор, собранный на открытой панели (рис. 60). Если генератор собран в корпусе, то следует разорвать цепь его питания и вывести два проводника для подключения схемы компенсации наружу.

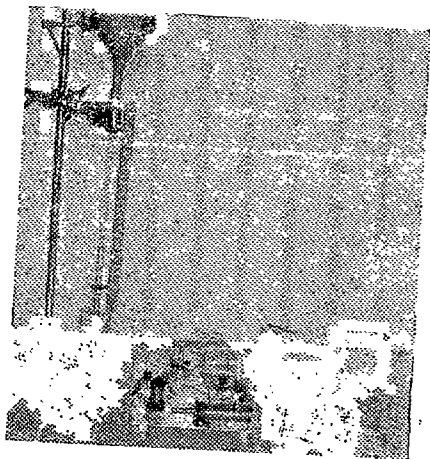


Рис. 60. Установка для проведения опытов с ультразвуковым интерферометром.

При сборке цепи компенсации используйте одну или две батарейки для карманного фонаря, переменный резистор с максимальным сопротивлением 250—500 Ом и авометр, например, типа Ц-20. Собрав установку, включите питание генератора и подсоедините в цепь батарейку. Только после этого можно включить в цепь авометр, причем использовать его следует как миллиамперметр с наибольшим пределом измерения (у авометра типа Ц-20 этот предел равен 750 мА). Настройте генератор в резонанс с вибратором. Изменяя переменным резистором величину тока компенсации, добейтесь, чтобы стрелка прибора оказалась вблизи нуля шкалы, а затем переключите миллиам-

перметр на меньший предел измерения и вновь повторите операцию компенсации тока. Описанным способом вы должны дойти до предела измерения 30 мА и установить переменным резистором стрелку миллиамперметра посередине шкалы.

Если в вашем распоряжении нет авометра, то вместо него можно использовать любой миллиамперметр с пределом измерения не больше 30 мА, рассчитав и изготовив по приведенным выше данным (для прибора Ц-20) шунтирующие его резисторы.

Настроив схему компенсации, начинайте опыт. Изменяя вращением винта струбцины степень сжатия

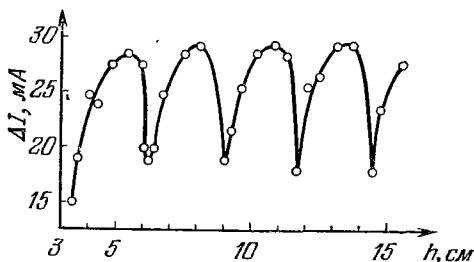


Рис. 61. График зависимости изменения тока, потребляемого ультразвуковым генератором, от высоты столба жидкости (воды) над излучателем.

груши, постепенно увеличивайте высоту столба жидкости над вибратором. При этом вы будете наблюдать, как стрелка прибора колеблется в такт с изменением громкости кавитационного шума, и сможете отмечать минимумы и максимумы потребляемой излучателем мощности значительно точнее, чем на слух. Если установка отлажена достаточно хорошо, то стрелка прибора в опыте будет колебаться почти на всю шкалу.

Столь значительные колебания стрелки позволят даже снять график зависимости изменения потребляемого генератором тока от высоты столба жидкости в трубке. Вы получите кривую, подобную той, которая нами снята в аналогичном опыте и изображена на рис. 61. По графику нетрудно с достаточной точностью определить длину ультразвуковой волны в жидкости и по известной частоте вычислить скорость звука.

В нашем опыте для скорости звука в воде получилось значение $c = \lambda f = 1350$ м/с. Будет совсем неплохо, если вы получите близкую величину: табличное значение скорости звука в воде равно 1495 м/с. Различие между табличной и измеренной в опыте скоростью звука объясняется, во-первых, относительной «грубостью» экспериментальной установки и, во-вторых, тем, что стеклянная трубка с жидкостью представляет собой волновод, скорость звука в котором отличается от скорости звука в свободной жидкости.

При исследовании зависимости потребляемого генератором тока от высоты столба жидкости над вибратором нередко вместе с «нужными» изменениями тока у вас будут получаться «ненужные» небольшие максимумы и минимумы. Их называют сателлитами (спутниками). Теория этого интересного явления не проста, и в нескольких словах ее не объяснить. Мы обращаем ваше внимание на сателлиты лишь для того, чтобы вы не смущались: их появление обусловлено не несовершенством вашей экспериментальной установки, а самим существом происходящих в ней физических явлений.

Магнитострикционный излучатель ультразвука средней частоты с ферритовым вибратором длиной около 20 мм позволяет поставить удивительные по красоте опыты стоячей ультразвуковой волной в жидкости.

Излучатель подключите к ламповому ультразвуковому генератору и поместите на торец вибратора каплю воды. Включите генератор и настройте его в резонанс с вибратором так, чтобы капля на торце начала колебаться.

В заранее приготовленный до опыта высокий стакан налейте дистиллированную или прокипяченную воду, а на его дно поместите слой крахмала толщиной в несколько миллиметров, стеклянной трубкой (внутренним диаметром 3—6 мм) сильно взболтайте крахмал так, чтобы образовалась однородная суспензия белого цвета. Той же трубкой наберите получившуюся взвесь крахмала в воде и, закрыв верхний ее конец пальцем, поместите нижний ее конец на торец вибратора работающего излучателя. При этом в столбе воды в трубке устанавливается стоячая ультразвуковая волна: через несколько секунд она

отчетливо обозначается собравшимися в ее пучностях частицами крахмала (рис. 62).

Когда вы помещаете на торец вибратора трубку с суспензией крахмала в воде, собственная частота вибратора слегка изменяется, так что для получения стоячей волны, возможно, потребуется небольшая подстройка частоты колебаний, даваемых ультразвуковым генератором. В целом же опыт очень прост и получается всегда, если излучатель работает нормально.

Внимательно рассмотрите стоячую ультразвуковую волну в трубке. Вы замечаете, что крахмал собирается в плотную область (как говорят, коагулирует) непосредственно у поверхности жидкости в трубке. Поскольку поверхность жидкости свободна, в ее плоскости образуется пучность смещений стоячей волны. Таким образом, опыт показывает, что крахмал коагулирует в пучностях смещений или узлах давлений стоячей ультразвуковой волны.

Однако так происходит не всегда. В этом нетрудно убедиться на примере эмульсии керосина в воде. Кратко рассмотрим способ получения эмульсии керосина в воде для опытов со стоячей волной.

В сосуд, имеющий в своем дне кран (или просто закрывающееся отверстие), налейте воду, а поверх нее — слой керосина. Погрузите ферритовый вибратор низкочастотного магнитострикционного излучателя,

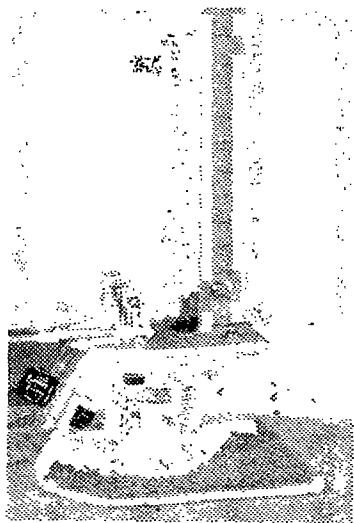


Рис. 62. Стоячая ультразвуковая волна в жидкости.

В опыте использован магнитострикционный излучатель для получения ультразвука средней частоты. С помощью линейки, закрепленной на стойке излучателя, можно измерить длину ультразвуковой волны. Крахмал коагулирует в пучностях смещений стоячей волны. Полезно сравнить эту фотографию с той, которая приведена на рис. 58.

обеспечивающего получение ультразвука частотой порядка 20 кГц, до границы раздела жидкостей и включите ультразвук. При этом в воде образуется белая эмульсия керосина. Для ускорения процесса можно передвигать излучатель вверх и вниз, чтобы его работающий вибратор многократно пересекал границу между несмешивающимися жидкостями. Дайте приготовленной эмульсии некоторое время

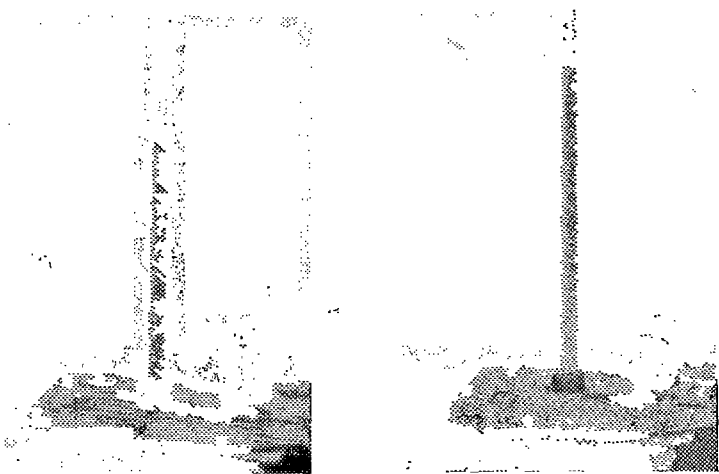


Рис. 63. Стоячая ультразвуковая волна в жидкости.

а. В трубке находится эмульсия керосина в воде. Керосин коагулирует в узлах смещений стоячей волны. Полезно сравнить результат этого опыта с опытами, фотографии которых приведены на рис. 57, 58 и 62. *б.* В трубке одновременно находятся суспензия крахмала в воде и эмульсия керосина в воде. Крахмал коагулирует в пучностях, а керосин — в узлах смещений стоячей волны.

отстояться, чтобы относительно крупные капли керосина успели всплыть вверх, и, открыв кран внизу сосуда, аккуратно слейте эмульсию в пробирку, отделяя ее тем самым от керосина. Для успешной постановки опыта важно отсутствие в эмульсии крупных капель керосина (эмульсия на вид должна быть совершенно однородной).

Полученную эмульсию наберите в стеклянную трубку и поместите ее на вибратор ультразвукового излучателя средней частоты точно так же, как вы это делали при использовании суспензии крахмала в во-

де. Спустя некоторое время после начала облучения (обычно значительно превышающее время, необходимое для коагуляции крахмала в воде) можно увидеть, как мельчайшие капельки керосина коагулируют, но теперь уже не в пучностях, а в узлах смещений, причем верхний узел отстоит от поверхности жидкости на четверть длины волны ультразвука.

Из опытов следует вывод, что диспергированное (размельченное) в жидкости вещество коагулирует в узлах смещений, если его плотность меньше плотности жидкости, и в пучностях смещений стоячей волны, если его плотность превышает плотность жидкости.

Для более эффективного подтверждения этого вывода можно провести опыт одновременно с эмульсией керосина и суспензией крахмала в воде. В последнем случае, поскольку керосин коагулирует в узлах смещений, а крахмал — в узлах давлений, эти вещества окажутся в трубке пространственно разделенными (рис. 63).

Сравните эти опыты с экспериментами со стоячей волной в трубке Кундта. Не правда ли, явления, происходящие в них, очень похожи?

Задание 32. Постройте модель ультразвукового интерферометра, пользуясь магнитострикционным излучателем ультразвука средней частоты. Ламповый генератор, обеспечивающий работу излучателя, питается переменным током. Означает ли это, что в схеме компенсации нельзя использовать измерительный прибор постоянного тока?

Задание 33. Применяя магнитострикционный излучатель, обеспечивающий получение ультразвука средней частоты, измерьте скорость звука в суспензии крахмала в воде. Оцените точность этих измерений по сравнению с точностью аналогичных измерений, которые можно сделать, пользуясь низкочастотным излучателем и суспензией алюминиевой краски в ацетоне.

Задание 34. Экспериментально докажите, что ультразвук может распространяться по изогнутому волноводу (рис. 64).

Задание 35. Вы поставили опыты по образованию стоячей волны в суспензии алюминиевой краски в ацетоне и в суспензии крахмала в воде. Первые опыты выше были объяснены ориентирующим действием ультразвука, а вторые — его коагулирующим действием. Правильны ли такие объяснения? Обоснуйте их соображениями, вытекающими непосредственно из эксперимента.

Задание 36. На поверхность вибратора магнитострикционного излучателя, дающего ультразвук частотой порядка 1 МГц, нанесите каплю транс-



Рис. 64. Ультразвуковые волноводы.

форматорного или вазелинового масла и поместите на нее склеенную из оргстекла кювету (дно кюветы должно иметь толщину не более 1 мм). В кювету налейте дистиллированную воду и взболтайте в ней небольшое количество крахмала (оптимальную «концентрацию» крахмала нетрудно подобрать опытным путем). Включите генератор и настройте его в резонанс с вибратором. Объясните наблюдаемое явление.

Задание 37. Выполнив опыт по предыдущему заданию, погрузите в налитую в кювету жидкость стеклянную пластинку толщиной около 2 мм так,

чтобы она была расположена под углом 45° к поверхности вибратора. Пронаблюдайте и объясните соответствующее явление.

Задание 38. Повторите опыты по образованию стоячей волны в суспензии алюминиевой краски в ацетоне, используя магнитострикционные излучатели, дающие ультразвук средней и высокой частот.

РАДИАЦИОННОЕ ДАВЛЕНИЕ УЛЬТРАЗВУКА

Продольная звуковая волна представляет собой периодически чередующиеся области сжатий и разрежений, которые распространяются в среде с постоянной скоростью. Следовательно, в каждой точке звукового поля существует переменное звуковое давление.

Вместе с тем звуковая волна оказывает и постоянное давление на встречающиеся на ее пути препятствия. Это давление звука называется радиационным.

Радиационное давление свойственно всем волнам вообще, независимо от их природы: и волны на поверхности жидкости, и звук, и свет «давят» на препятствия. Экспериментальное доказательство существования светового давления, полученное русским физиком П. Н. Лебедевым, явилось выдающимся вкладом в науку и принесло славу блестящего экспериментатора нашему соотечественнику. Его ученик А. Б. Альтберг, будучи еще студентом, построил первый звуковой радиометр и доказал существование радиационного давления звука. Чтобы почувствовать, насколько непросты были его опыты, проведенные в начале этого столетия, достаточно вдуматься в их условия. Молодой ученый экспериментировал со звуковыми волнами в воздухе длиной порядка 10 см, излучателем которых служила стеклянная трубка, возбуждаемая трением. Громкость звука, обеспечивающего снятие надежных показаний радиометра, была настолько велика, что исследователь мог проводить эксперимент, только закрыв слуховые проходы ушей стеклянными шариками. Вы будете ставить аналогичные опыты с ультразвуковыми волнами в воздухе, имеющими не меньшую интенсивность, но не будете

испытывать никаких неприятных ощущений, поскольку эти волны неслышимы.

Теория давления звука, для развития которой особенно много сделали Рэлей, Ланжевен и Бриллюэн, показывает, что радиационное давление в свободной среде на полностью поглощающее звук препятствие $S_{\text{п}}$ численно равно средней плотности акустической энергии E вблизи препятствия:

$$S_{\text{п}} = E, \quad (37)$$

а давление на полностью отражающее препятствие S_0 в два раза больше:

$$S_0 = 2E. \quad (38)$$

Вспоминая выражение (11) для интенсивности ультразвука, получаем

$$S_{\text{п}} \approx I/c \quad \text{и} \quad S_0 \approx 2I/c. \quad (39)$$

Модель простейшего радиометра можно построить, положив в ее основу конструкцию крутильных весов. Изогните медную проволоку диаметром 0,8—1 мм, как показано на рис. 65, и, натянув между ее концами тонкую медную проволоку диаметром около 0,05 мм, припаяйте ее концы. К середине этой проволочки припаяйте маленький латунный диск, а к нему пластилином или расплавленным воском прикрепите коромысло из проволоки диаметром 0,15—0,2 мм. На одном конце коромысла пластилином закрепите крылышко из кальки или тонкого листочка слюды (его можно изготовить, расщепив с помощью лезвия более толстый листок). Передвигая по другому плечу коромысла небольшой грузик из проволочки, уравновесьте крутильные весы.

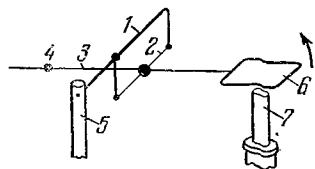


Рис. 65. Конструкция ультразвукового радиометра.

1—изогнутая толстая медная проволока, 2—натянутая между ее концами тонкая медная нить, 3—коромысло, 4—грузик из пластилина или проволоки, 5—стойка, 6—крылышко из кальки, 7—ферритовый вибратор низкочастотного излучателя.

Поставьте под крылышко магнито-стрикционный излучатель, вибратор которого имеет длину около

100 мм. Торец вибратора должен отстоять от радиометра на расстояние не более 3—5 мм. Как только вы включите ультразвук, коромысло с крылышком сразу отклонится от вибратора.

Этим опытом вы доказали существование радиационного давления ультразвука. Однако, более внимательно анализируя условия опыта, вы заметите, что отклонение крылышка радиометра может обуславливаться и действием ультразвукового ветра. Чтобы исключить влияние последнего, введите между вибратором излучателя и радиометром тонкую мембрану, препятствующую прохождению потоков воздуха. Такой мембраной может послужить листок папиросной бумаги. Ясно, что поток воздуха — ультразвуковой ветер — через бумагу не пройдет, а на интенсивность доходящей до радиометра ультразвуковой волны столь тонкое препятствие практически не повлияет. Поэтому, если радиометр показывает наличие радиационного давления, а не ультразвукового ветра, его крылышко после введения бумажной мембраны должно опасть лишь незначительно, что и подтвердит ваш эксперимент.

Все было бы очень хорошо, если бы акустический ветер образовывался только возле излучателя. Однако он возникает по всему объему среды, где существует ультразвуковая волна. Таким образом, поместив над вибратором тонкую мембрану, вы ослабили влияние ультразвукового ветра, но не исключили его совсем.

Чтобы все же убедиться, что ваш прибор реагирует на радиационное давление, а не на что-либо иное, поступите следующим образом. Настроив генератор в резонанс с вибратором, добейтесь отклонения крылышка радиометра и выключите генератор. После того как коромысло радиометра займет исходное положение, включите ультразвук. Крылышко немедленно отклонится. Следовательно, прибор реагирует на радиационное давление — ведь на образование акустического ветра необходимо заметное время, в течение которого придет в движение воздух.

Радиационное давление можно обнаружить и в жидкости. В боковой стенке кюветы из оргстекла сделайте отверстие и пластилином закрепите в

нем стеклянную трубку, надетую на вибратор излучателя. Сделать это нужно для того, чтобы уменьшить потери интенсивности при введении ультразвука в воду (рис. 66).

Далее изготовьте радиометр. Прежде всего сделайте диск, полностью отражающий ультразвук в жидкость. Для этого вырежьте из тонкой латуни два круга диаметром около 30 мм и спаяйте их по краю так, чтобы между ними осталась воздушная прослойка. Как вам уже хорошо известно, ультразвук практически полностью отражается на границе раздела жидкость—газ, и поэтому можно считать, что коэффициент отражения в жидкости от диска, изготовленного описанным способом, равен единице. Пластилин или воск укрепите диск на стержне из медной

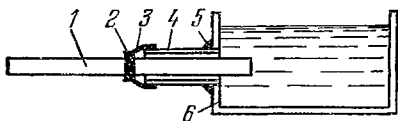


Рис 66. Способ введения ультразвука в жидкость, заполняющую кювету.

1—ферритовый вибратор, 2—резинное колечко, расположенное посередине вибратора, 3—отрезок резиновой трубки, 4—стеклянная трубка, 5—пластилин, 6—кювета из оргстекла с жидкостью.

проволоки и припаяйте его к горизонтальной оси, вращающейся с небольшим трением в конусных подшипниках скобы из жести. Такие подшипники нетрудно получить, выдавив шилом углубления в жестяной полоске. К оси припаяйте горизонтальный рычаг, по которому могла бы перемещаться небольшая гирька из медной проволоки (рис. 67).

Опустив диск радиометра в заполняющую кювету воду так, чтобы он был расположен на расстоянии нескольких миллиметров перед вибратором излучателя, уравновесьте передвижением гирьки радиометр. Затем включите ультразвуковой генератор и наблюдайте за отклонением диска.

Отметив перед началом опыта первоначальное положение диска, передвижением гирьки по горизонтальному рычагу радиометра вы можете при включенном ультразвуке вернуть диск прибора в отмечен-

ное положение. Измерьте линейкой расстояние l от гирьки до оси и h от оси до центра диска. Взвешиванием определите вес P вашей гирьки. Тогда, учитывая, что прибор находится в равновесии, можно записать уравнение

$$Fh = Pl,$$

где F — сила, действующая на диск со стороны ультразвуковой волны. Поскольку площадь диска

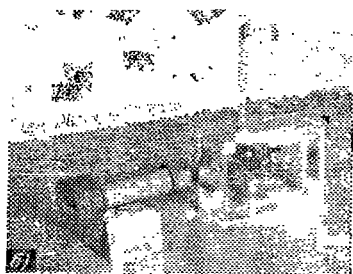
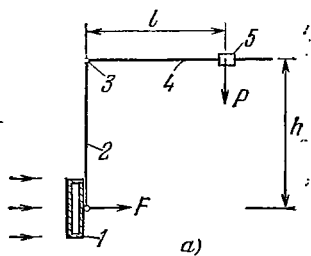


Рис. 67. К измерению радиационного давления ультразвука в жидкости.

Конструкция радиометра (а) и внешний вид установки (б):

1 — полый латунный диск, 2 — стержень из медной проволоки, 3 — горизонтальная ось вращения, 4 — рычаг, 5 — грузик. Клемма на передней стенке кюветы предназначена для крепления различных приспособлений, например, магнитоотрикссионного излучателя на частоту 8—15 МГц.

диаметром d равна $1/4\pi d^2$, отсюда для радиационного давления получаем формулу

$$S_0 = \frac{4F}{\pi d^2} = \frac{4Pl}{\pi d^2 h}. \quad (40)$$

Таким образом, интенсивность ультразвука в жидкости (не забывайте, что мы считаем диск радиометра полностью отражающим) можно рассчитать по формуле

$$I = \frac{S_0 c}{2} = \frac{2Plc}{\pi d^2 h}. \quad (41)$$

Подставив в эту формулу экспериментальные данные, вы получите значение интенсивности ультразвука порядка нескольких десятых ватта на квадратный сантиметр. Не нужно преувеличивать точность своих измерений, но по порядку величины вы получаете верные результаты.

Радиационное давление ультразвука ответственно еще за один акустический эффект второго порядка: ультразвуковой фонтан на границе раздела двух жидкостей или жидкости и газа. Наблюдать «настоящий» фонтан на тех частотах и с теми интенсивностями ультразвука, с которыми вы имеете дело (без дополнительных средств, о которых речь пойдет ниже), довольно трудно, но обнаружить обусловленное радиационным давлением вспучивание поверхности жидкости вполне можно.

Налейте в баночку, укрепленную на вибраторе, как описано выше (см. рис. 56), немного воды так, чтобы торец вибратора находился на глубине 1—2 мм под поверхностью жидкости. Подайте ультразвук максимальной интенсивности. Тогда вода над вибратором вспучится, образуя хорошо заметный бугорок.

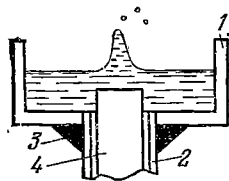


Рис. 68. Ультразвуковой фонтанчик на поверхности жидкости.

1—баночка, 2—стеклянная трубка, 3—пластилин, 4—ферритовый вибратор низкочастотного излучателя.

В опыте вместо воды лучше использовать спирт. Если вы тщательно отладите установку, то сумеете получить фонтанчик высотой до 1 см, из которого будут вылетать небольшие капли спирта (рис. 68).

Задание 39. Поставьте опыты по радиационному давлению ультразвука в воздухе, пользуясь магнито-стрикционным излучателем без подмагничивания с вибратором длиной 40—50 мм. Сравните интенсивность ультразвука, создаваемого в воздухе излучателями, вибраторы которых имеют длину около 160 и 50 мм.

ФОКУСИРОВКА УЛЬТРАЗВУКА ЛИНЗОЙ

Для увеличения интенсивности ультразвука в определенном направлении или в некоторой области применяются акустические фокусирующие системы. Простейшими из них являются зеркала и линзы. Изготовить ультразвуковую линзу довольно просто, а опыты с ней настолько красивы и физически содер-

жательны, что опускать их описание было бы неразумно.

Фокусное расстояние ультразвуковой линзы можно найти аналогично тому, как это делается для оптической линзы. Пусть плоская ультразвуковая волна нормально падает на тонкую плоско-вогнутую линзу. Положим, что после прохождения линзы все лучи, падавшие на нее параллельно главной оптической оси, соберутся в точке F , которая является фокусом линзы. Обозначим радиус кривизны вогнутой поверхности линзы через R ; пусть α и β — соответственно углы падения и преломления волн на границе раздела сред 1 и 2, в которых скорости звука равны c_1 и c_2 (рис. 69).

Согласно закону преломления, справедливому для волн любой природы,

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{c_1}{c_2} = n_{12}, \quad (42)$$

где n_{12} — относительный показатель преломления второй среды по отношению к первой. Рассматривая лишь параксиальные, или приосевые, лучи (только в этом случае все лучи ультразвукового пучка соберутся в фокусе), мы должны считать углы α , β и γ малыми. Заменяя синусы самими углами, из (42) имеем

$$\alpha = n_{12}\beta. \quad (43)$$

Из рис. 69 видно, что $\beta + \gamma = \alpha$, следовательно, формулу (43) можно переписать в виде

$$\alpha = n_{12}(\alpha - \gamma). \quad (44)$$

При малых углах, очевидно, $\alpha = h/R$ и $\gamma = h/F$. Подставляя эти значения α и γ в формулу (44), получим

$$\frac{h}{R} = n_{12} \left(\frac{h}{R} - \frac{h}{F} \right).$$

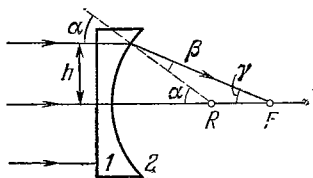


Рис. 69. К выводу формулы для фокусного расстояния ультразвуковой линзы.

Буквой R обозначены центр кривизны и радиус сферической поверхности, буквой F — фокус и фокусное расстояние линзы.

Отсюда искомое фокусное расстояние F ультразвуковой линзы равно

$$F = \frac{R}{1 - 1/n_{12}} = \frac{R}{1 - c_2/c_1}. \quad (45)$$

Исследуем полученную формулу. Если скорость звука в материале линзы больше, чем в окружающей линзу среде ($c_1 > c_2$), то $F > 0$, т. е. линза имеет действительный фокус и является собирающей. При $c_1 < c_2$ фокусное расстояние $F < 0$; линза имеет мнимый фокус и является рассеивающей.

В оптике, да и в повседневной жизни, вы привыкли к тому, что плоско-вогнутая линза всегда ведет себя как рассеивающая. Слово «всегда» в этом утверждении совершенно неуместно. Одна и та же линза может

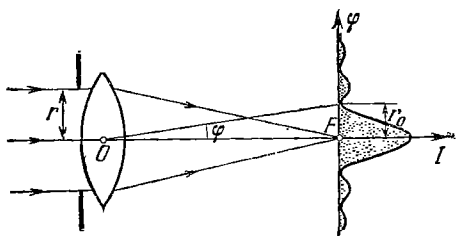


Рис. 70. К расчету увеличения интенсивности ультразвука в фокусе линзы.

быть как собирающей, так и рассеивающей в зависимости от того, в какой среде и для каких волн она используется. Например, ниже будет описана линза из оргстекла, которая является собирающей для распространяющихся в воде ультразвуковых волн и рассеивающей для распространяющихся в воде или воздухе световых волн. Общность и различие физических свойств волн разной природы выступают в этом примере с особенной отчетливостью.

Если бы все лучи, как мы предположили, действительно собирались в фокусе линзы, то интенсивность ультразвука в фокусе была бы бесконечно велика. Этого, разумеется, не может быть. И действительно, дифракция ультразвука на диафрагме линзы (отверстии, ограничивающем размеры линзы) приводит к тому, что какой бы геометрически совершенной ни

была линза, фокусом ее является не точка, а определенная область конечных размеров. Распределение интенсивности ультразвука в фокальной плоскости линзы показано на рис. 70. Оно состоит из центральной круговой области максимальной интенсивности, окруженной концентрическими круговыми зонами чередующейся минимальной и максимальной интенсивности ультразвука.

Из дифракционной теории известно, что практически вся энергия (а точнее, 84%) прошедшей через линзу волны сосредоточена в центральном максимуме интенсивности дифракционной картины, расположенной в фокальной плоскости линзы. Пренебрегая потерями на отражение и поглощение ультразвука в линзе, можно считать, что средняя интенсивность ультразвуковой волны в фокусе линзы во столько раз больше интенсивности падающей на линзу волны, во сколько раз площадь незранированной части линзы больше площади центрального максимума дифракционной картины.

Площадь незранированной части линзы $S_{\text{л}} = \pi r^2$, а площадь центрального максимума дифракционного распределения интенсивности в фокальной плоскости $S_{\text{ф}} = \pi r_0^2$ (см. рис. 70). Следовательно, интенсивность ультразвуковой волны в фокусе линзы

$$I_{\text{ф}} = I_{\text{пад}} (r/r_0)^2, \quad (46)$$

где $I_{\text{пад}}$ — интенсивность падающей на линзу волны.

Согласно дифракционной теории направление на первый минимум интенсивности определяется формулой

$$\sin \varphi = 0,61 \lambda / r, \quad (47)$$

где λ — длина ультразвуковой волны. При малых углах φ (что всегда наблюдается при r , достаточно больших по сравнению с λ), значение синуса угла можно заменить самим углом. Из рис. 70 следует, что $\varphi = r_0/F$; подставляя это значение в формулу (47), получим

$$r_0/F = 0,61 \lambda / r.$$

Выразив отсюда r_0 и подставив его в (46), будем иметь

$$I_{\Phi} = I_{\text{пад}} \left(\frac{r^2}{0,61\lambda F} \right)^2 = 2,68 \frac{r^4}{F^2\lambda^2} I_{\text{пад}}.$$

Вспоминая, что в центральном дифракционном максимуме интенсивности сосредоточено лишь 84% падающей на линзу энергии (остальная распределена между дифракционными кольцами), окончательно получаем выражение для средней интенсивности ультразвука в фокусе линзы

$$I_{\Phi} = 2,25 \frac{r^4}{F^2\lambda^2} I_{\text{пад}}. \quad (48)$$

Мы не напрасно вывели эту формулу: физически она гораздо содержательнее формулы для фокусного расстояния линзы (45). Действительно, пользуясь формулой (45), можно было бы подумать, что для фокусировки ультразвука достаточно сделать линзу из подходящего материала и разместить ее в подходящей среде. Однако формула (48) показывает, что этого далеко не достаточно: необходимо еще, чтобы площадь линзы (квадрат радиуса r) была велика по сравнению с произведением длины ультразвуковой волны на фокусное расстояние линзы. Иными словами, линза будет фокусировать ультразвук тогда, когда можно считать, что дифракция ультразвуковой волны на линзе пренебрежимо мала.

Не правда ли, любопытная ситуация! Считая, что линза фокусирует ультразвук, мы должны пренебречь дифракцией, но до конца этого делать нельзя: полностью пренебрегая дифракцией, мы получили бы бесконечно большую интенсивность ультразвука в фокусе линзы. Таким образом, в формуле (48) можно усмотреть границу между геометрической и волновой (или дифракционной) теорией создания изображения линзой.

Обычно полагают, что дифракция «происходит», когда размеры препятствий малы по сравнению с длиной волны. В действительности же, дифракция существует всегда независимо от размеров препятствий. Соотношение (48) показывает, что дифракцией волны пренебрегать нельзя, если произведение длины волны на расстояние от препятствия до места наблюдения

дифракции (в нашем случае это фокусное расстояние линзы) сравнимо с квадратом поперечного размера препятствия.

Из формулы (48) следует и практически важный для дальнейшего вывод: чтобы интенсивность в фокусе линзы была как можно больше, нужно изготовить линзу большего радиуса, меньшего фокусного расстояния, и использовать ультразвук возможно более высокой частоты.

Наиболее подходящим материалом для самостоятельного изготовления ультразвуковой линзы является оргстекло. Скорость звука в оргстекле составляет около 2700 м/с, плотность оргстекла равна 1,18 г/см³. Следовательно, показатель преломления оргстекла относительно воды (см. формулу (42)) $n_{21} = 1/n_{12} = c_2/c_1 = 1500/2700 \approx 0,56$, а коэффициент отражения согласно формуле (31) составляет 13%. Оргстекло вполне доступно и легко поддается обработке, поэтому мы подробно рассмотрим способ изготовления ультразвуковой линзы из этого материала.

Стальной шарик диаметром 20 мм от шарикоподшипника нагрейте на пламени газовой горелки или в печи докрасна и затем медленно остудите. В отожженном шарике просверлите отверстие и нарежьте в нем резьбу. К шарикю на резьбе прикрепите стальной стержень (рис. 71).

Стержень с шариком на его конце зажмите в патрон сверлильного станка. Включив станок, подведите вращающийся шарик к пластинке оргстекла толщиной 12—15 мм и прижмите его к поверхности пластинки. За счет трения шарик нагревается, плавит оргстекло и под нажимом погружается в него. Когда глубина погружения станет примерно равна радиусу шарика, выключите станок, не уменьшая при этом давления шарика на оргстекло. Раскаленный шарик охладите

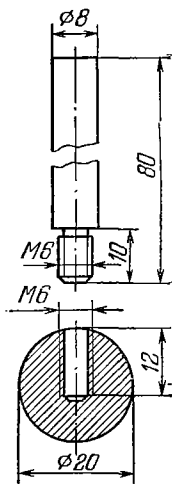


Рис. 71. Приспособление для изготовления ультразвуковой линзы из оргстекла.

водой и только после этого удалите из углубления.

Образовавшиеся на поверхности оргстекла со стороны углубления наплывы сточите напильником. Наименьшая толщина линзы не должна превышать 0,5—1 мм. Поэтому плоскую поверхность линзы также сточите, уменьшая толщину линзы до необходимого значения, а затем отшлифуйте мелкой шкуркой и отполируйте полировательной пастой ГОИ, нанесенной на суконку. В результате у вас получится плоско-вогнутая линза из оргстекла с радиусом сферической поверхности 10 мм.

Полировка линзы не обязательна. Однако, отполировав плоскую поверхность линзы, вы сделаете ее прозрачной и сможете убедиться, что собирающая ультразвуковая линза является рассеивающей оптической.

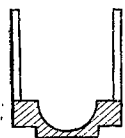


Рис. 72. Линзовый сосуд из оргстекла для опытов по фокусировке ультразвука.

Из оргстекла толщиной 3—4 мм сделайте прямоугольную кювету без дна внутренним размером примерно $25 \times 25 \times 40$ мм³. Для склейки оргстекла можно использовать дихлорэтан, уксусную кислоту или эпоксидную смолу. Снизу к кювете приклейте ультразвуковую линзу так, чтобы она являлась ее дном. Вы получите удобный для опытов линзовый сосуд, разрез которого показан на рис. 72.

Для постановки опытов подготовьте к работе один из магнитострикционных излучателей, рассчитанных на получение ультразвука частотой от 1 до 3 МГц. На рабочую поверхность ферритового вибратора нанесите каплю трансформаторного, вазелинового или подсолнечного масла. Поместите на вибратор линзовый сосуд так, чтобы между его поверхностью и плоскостью линзы образовался слой масла без воздушных пузырьков. Вы уже знаете, зачем это необходимо: масло обеспечивает акустический контакт между вибратором и линзой; если в слое масла будут воздушные пузырьки, интенсивность ультразвука, падающего на линзу, за счет сильного отражения от воздуха значительно уменьшится. Помещая линзовый сосуд на вибратор, нужно следить за тем, чтобы масло не попадало на нижнюю поверхность вибратора.

Налейте в линзовый сосуд немного дистиллированной воды, включите генератор и настройте его в резонанс с вибратором. На поверхности воды вы заметите довольно большую область вспучивания. Постепенно добавляя воду в сосуд, вы увидите, как размеры области, в которой происходит вспучивание поверхности, уменьшаются, появляется небольшой бугорок, он растет, из его центра начинают вылетать брызги и, наконец, образуется мощный ультразвуковой фонтан! Если и дальше добавлять воду, то высота фонтана постепенно уменьшится, затем он исчезнет и наблюдается вновь лишь область вспучивания поверхности воды.

На рис. 73 представлены фотографии ультразвуковых фонтанов, полученных в воде с помощью несимметричного ультразвукового излучателя на частоту 1 МГц.

Какие выводы следуют из этого опыта? Во-первых, линза из оргстекла действительно фокусирует распространяющуюся в воде ультразвуковую волну. Во-вторых, опыт показывает, что существует явление преломления ультразвуковой волны на границе раздела между жидкостью и твердым телом. В-третьих, из опыта можно сделать заключение, что скорость ультразвука в оргстекле действительно больше, чем в воде.

В экспериментах по фокусировке ультразвуковой волны вместо дистиллированной воды можно использовать прокипяченную воду. Применять водопроводную воду нежелательно: в ней растворено значительное количество воздуха, и интенсивность ультразвука в такой воде будет мала. Фонтан получится еще выше, если применять керосин или спирт.

Из формулы (48) следует, что интенсивность ультразвука в фокусе линзы возрастает с уменьшением длины ультразвуковой волны, или увеличением ее частоты. Высота фонтана определяется величиной радиационного давления ультразвука на поверхность жидкости, а последняя однозначно связана с интенсивностью. Таким образом, высота фонтана может служить мерой интенсивности ультразвука.

На рис. 74 представлены фотографии ультразвуковых фонтанов, полученных с помощью магнитоотричного излучателя на частоту 3—5 МГц. Высоты

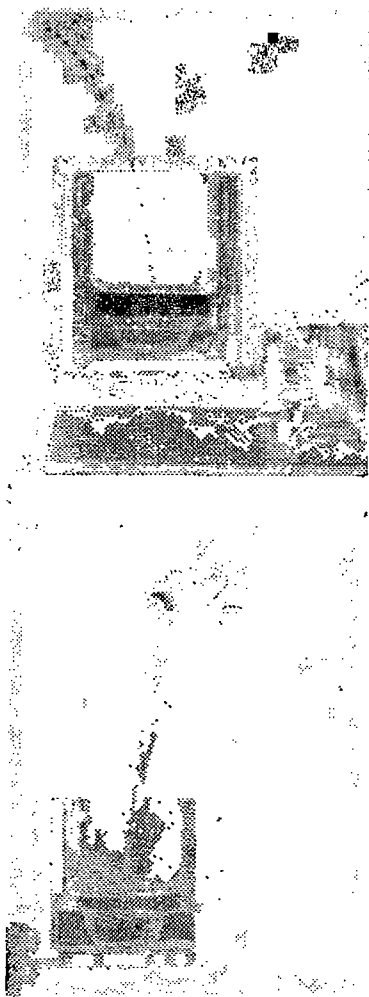


Рис. 73. Ультразвуковые фонтаны, полученные с помощью магнито-стрикционного излучателя на частоту 1 МГц. Любопытно, что фонтан всегда бьет в сторону от обмотки возбуждения несимметричного излучателя. На фотографии хорошо видно, что капли из фонтана вылетают почти со строгой периодичностью.

их примерно в три раза больше, чем высоты фонтанов, изображенных на рис. 73.

Не следует преувеличивать доказательность опытов с получением фонтана на разных частотах. Чтобы выводы из таких опытов были строгими, необходимо обеспечить равенство интенсивностей ультразвука,

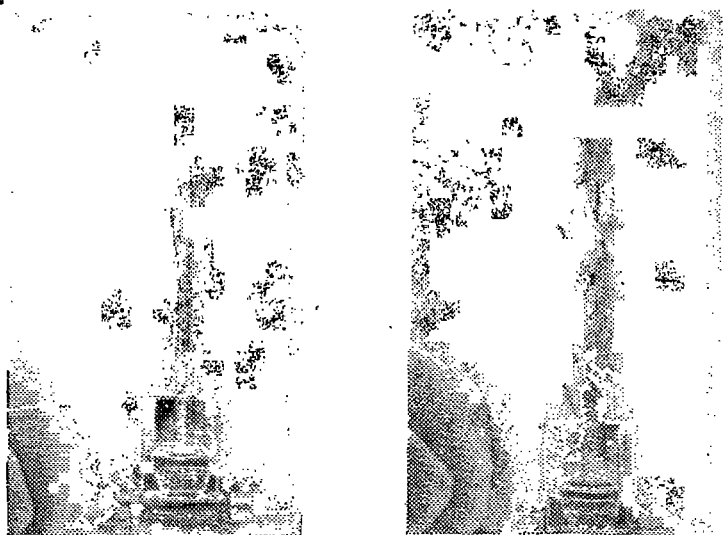


Рис. 74. Ультразвуковые фонтаны (частота ультразвука 3—5 МГц). При хорошей наладке установки высота фонтана достигает 30—40 см. Фонтан бьет вертикально вверх (симметричный излучатель), Фонтанирование сопровождается интенсивным образованием тумана (аэрозоля).

даваемого магнитострикционными излучателями разных частот. И все же качественно эти опыты подтверждают зависимость интенсивности в фокусе линзы от длины ультразвуковой волны.

Задание 40. В линзовый сосуд, помещенный на вибратор высокочастотного магнитострикционного излучателя, налейте дистиллированную воду так, чтобы ее поверхность была значительно выше фокальной плоскости линзы. В воде размешайте небольшое количество крахмала. Включите ультразвук

и пронаблюдайте фокусировку ультразвуковой волны линзой (рис. 75).

Задание 41. Может случиться так, что вы не сможете воспользоваться сверлильным станком для изготовления ультразвуковой линзы. Разработайте метод и, пользуясь им, изготовьте ультразвуковую линзу из зубопротезной пластмассы «Протакрил» или из эпоксидной смолы.

УЛЬТРАЗВУКОВОЙ «ФОНТАН НАОБОРОТ» И ДРУГИЕ ИНТЕРЕСНЫЕ ЯВЛЕНИЯ

Оценим величину радиационного давления на границу раздела двух сред. Для этого воспользуемся правдоподобным физико-математическим рассуждением. Оно позволит вам уяснить суть дела и получить верный окончательный результат.

В справедливости найденного результата вы сможете убедиться, поставив соответствующие опыты.

Пусть на границу раздела двух сред с акустическими сопротивлениями $\rho_1 c_1$ и $\rho_2 c_2$ нормально падает ультразвуковой пучок (рис. 76). Во второй среде распространяется проходящая ультразвуковая волна, в которой частицы среды колеблются с максимальной скоростью $U_{\text{пр}}$. По закону Бернулли давление внутри пучка проходящей волны меньше,




Рис. 75. Фокусировка ультразвуковой волны линзой.

В отсутствие линзы ультразвук распространяется широким пучком (см. рис. 95).

чем в окружающей пучок среде, на величину $\frac{1}{2}\rho^2 U_{\text{пр}}^2$. В первой среде в одном и том же пучке, но в противоположных направлениях распространяются одновременно падающая и отраженная волны. Если максимальные значения колебательных скоростей этих волн обозначить $U_{\text{пад}}$ и $U_{\text{отр}}$, то можно записать, что давление в рассматриваемом ультразвуковом пучке меньше давления в окружающей его среде на величину $\frac{1}{2}\rho_1 U_{\text{пад}}^2 + \frac{1}{2}\rho_1 U_{\text{отр}}^2$. Гидростатическое давление

в обеих средах, очевидно, можно считать одинаковым, поэтому радиационное давление на границу раздела сред равно

$$S = \frac{1}{2}\rho_1 U_{\text{пад}}^2 + \frac{1}{2}\rho_1 U_{\text{отр}}^2 - \frac{1}{2}\rho_2 U_{\text{пр}}^2.$$

Вспоминая, что $\frac{1}{2}\rho U^2 = E$ (см. формулу (10)), получаем, что радиационное давление на границу раздела сред выражается через средние плотности энергии формулой

$$S = E_{\text{пад}} + E_{\text{отр}} - E_{\text{пр}}. \quad (49)$$

Эта формула включает в себя формулы (37) и (38) как частные случаи. Действительно, если ультразвук падает на полностью поглощающее или полностью отражающее препятствие, то внутрь препятствия волна не проникает и $E_{\text{пр}} = 0$. Для полностью поглощающего препятствия $E_{\text{отр}} = 0$ и из (49) мы получаем формулу (37). Если препятствие полностью отражает ультразвук, то $E_{\text{пад}} = E_{\text{отр}}$ и из (49) получается выражение (38).

Поскольку $E_{\text{отр}} = R E_{\text{пад}}$, где R — коэффициент отражения, формулу (49) можно записать в виде

$$S = (1 + R) E_{\text{пад}} - E_{\text{пр}}. \quad (50)$$

Интенсивности падающей, отраженной и проходящей волн связаны соотношением $I_{\text{пад}} = R I_{\text{пад}} + I_{\text{пр}}$. Учитывая, что $I = cE$ (см. (11)), имеем

$$c_1 (1 - R) E_{\text{пад}} = c_2 E_{\text{пр}}.$$

Подставляя найденное из последней формулы значение $E_{\text{пр}}$ в выражение (50), окончательно получаем, что радиационное давление на границу раздела сред равно

$$S = \left[1 - \frac{c_1}{c_2} + R \left(1 + \frac{c_1}{c_2} \right) \right] E_{\text{пад}}. \quad (51)$$

Полученная формула почти так же красива, как и те физические явления, которые она описывает. Особую прелесть ей придает знак минус перед

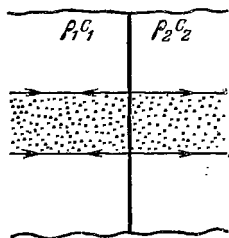


Рис. 76. К выводу формулы радиационного давления на границу раздела двух жидкостей.

отношением c_1/c_2 : он показывает, что в некоторых условиях радиационное давление может быть отрицательным. Физически это означает (вернитесь к исходным посылкам приведенного вывода), что радиационное давление может быть направлено навстречу падающему на границу раздела двух сред ультразвуковому пучку!

В табл. 1 приведены значения радиационного давления (при $E_{\text{пад}} = 1$) для некоторых пар распространенных жидкостей. Значения S рассчитаны в предположении, что ультразвуковая волна падает на границу раздела из жидкости с большей плотностью.

Таблица 1

	Глицерин	Вода	Трансформаторное масло	Керосин	Этиловый спирт
Четыреххлористый углерод	0,59	0,37	0,35	0,32	0,30
Глицерин		-0,15	-0,13	-0,11	-0,11
Вода			-0,04	-0,10	-0,15
Трансформаторное масло				-0,08	-0,15
Керосин					-0,09

Индикатором радиационного давления может служить ультразвуковой фонтан: его величина и направление могут характеризовать величину и направление радиационного давления. Поскольку интенсивность ультразвука, даваемого простыми генераторами и излучателями, обычно недостаточна для образования заметного фонтана, ультразвуковой пучок следует сфокусировать линзой. Удобные для постановки описанных ниже опытов жидкости либо растворяют оргстекло, либо сильно загрязняют его. Поэтому линзовый сосуд лучше изготовить из стеклянной трубки подходящего диаметра с отогнутыми, как у пробирки, краями. Способ крепления линзы из оргстекла

показан на рис. 77. Такой линзовый сосуд обладает тем преимуществом, что вышедшую из строя в результате растворения какой-либо жидкостью линзу (а в ультразвуковом поле процесс растворения идет гораздо быстрее!) можно легко и быстро заменить новой.

Техника проведения опытов по радиационному давлению достаточно проста: в линзовый сосуд слоями наливают жидкости, на границах раздела которых будет изучаться ультразвуковой фонтан, и, обеспечив акустический контакт, помещают сосуд его дном на вибратор излучателя, дающего ультразвук частотой 1—3 МГц. Для получения фонтанов наибольших размеров необходимо экспериментально подобрать оптимальную толщину слоев жидкостей. Этот подбор следует произвести, учитывая то, что границы раздела жидкостей, получающиеся в виде менисков, сами фокусируют ультразвук. Поскольку все жидкости, перечисленные в табл. 1, достаточно прозрачны и бесцветны, ту, из которой бьет ультразвуковой фонтан, желателен окрасить.

В линзовый сосуд поверх подкрашенного красными чернилами для авторучек и слегка разбавленного водой спирта наливают керосин (спирт следует разбавлять лишь до такой степени, чтобы он тонул в керосине; обычно бывает вполне достаточно подкрасить его). При прохождении ультразвуковой волны наблюдают фонтан, направленный из спирта в керосин (рис. 78).

В линзовый сосуд последовательно налейте трансформаторное масло, подкрашенный спирт и керосин. При включении ультразвукового генератора можно одновременно увидеть три фонтана (рис. 79): из спирта в масло (радиационное давление отрицательно), из спирта в керосин и из керосина в воздух (радиационные давления положительны). Еще две фотографии фонтанов на границах раздела указанных жидкостей

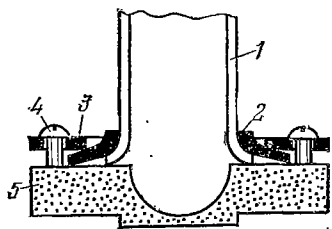


Рис. 77. Чертеж линзового сосуда.

1—стеклянная трубка с отогнутыми краями, 2—резиновое кольцо толщиной 1,5—2 мм, 3—шайба из гетинакса, 4—болты, 5—линза.

при частотах 1 (а) и 3 МГц (б) приведены на рис. 80 (кстати, эти фотографии дают наглядное представле-

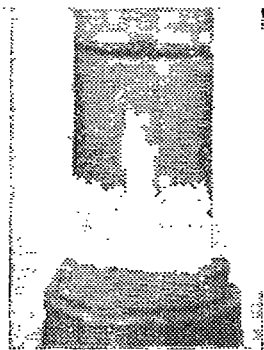


Рис. 78. Ультразвуковой фонтан на границе раздела спирт — керосин.

В опыте использован пьезоэлектрический излучатель ультразвука на частоту около 3 МГц. Линза изготовлена из зубопротезной пластмассы «Протакрил».

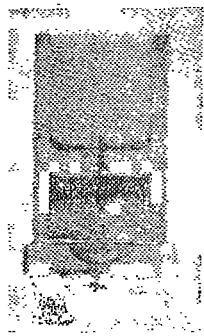


Рис. 79. Ультразвуковые фонтаны на границах раздела масло — спирт, спирт — керосин и керосин — воздух.

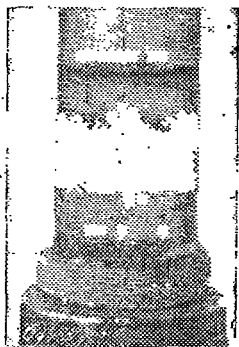
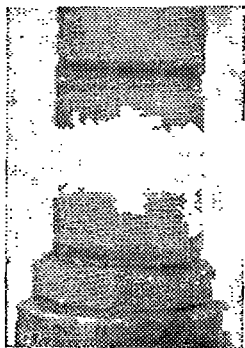


Рис. 80. Ультразвуковые фонтаны на границах раздела масло — спирт (а), спирт — керосин (б).

ние о размерах фокуса в зависимости от длины ультразвуковой волны).

Если на двух последних рисунках изображены фонтаны, направленные в разные стороны от среднего

слоя жидкости, то на рис. 81 показаны фонтаны, направленные навстречу друг другу. В линзовый сосуд слоями последовательно налиты четыреххлористый углерод, трансформаторное масло и подкрашенный спирт.

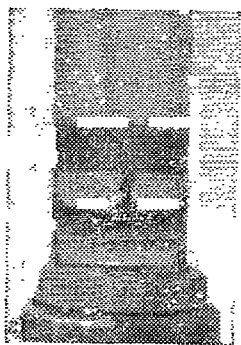
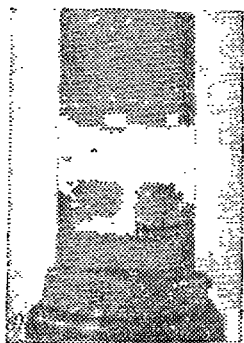
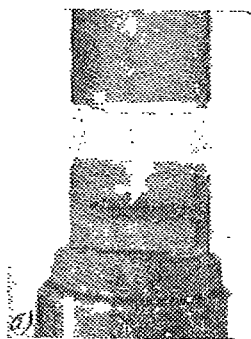
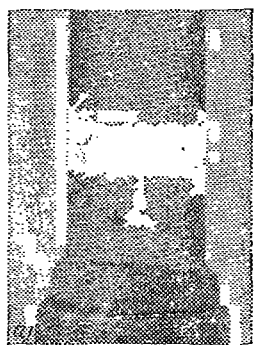


Рис. 81. Направленные навстречу друг другу ультразвуковые фонтаны на границах раздела четыреххлористый углерод — масло — спирт.

а, б, в, г — последовательные этапы перехода спирта.

спирт. При прохождении ультразвука в таких условиях наблюдается любопытное явление: фонтаны, образованные на границах четыреххлористый углерод — масло и масло — спирт и направленные навстречу друг другу, соединяются; спирт и четыреххлористый углерод, взаимно растворяясь, окрашиваются, и получающийся раствор постепенно переходит вниз, занимая

область между четыреххлористым углеродом и маслом. Процесс зачастую продолжается до тех пор, пока поверхность масла почти совсем не остается спирта: последний как бы перетекает вниз по каналу, образованному соединившимися фонтанами. На рис. 81 уменьшение толщины слоя спирта не заметно потому, что выпуклый вверх мениск границы масло — спирт не позволяет увидеть этого. Если перед опытом стенки линзового сосуда слегка смазать трансформаторным маслом так, чтобы они не смачивались спиртом, то описанное явление будет заметно особенно хорошо.

Мы уже отмечали, что радиационное давление характерно для волн любой природы. Как вы думаете, можно ли, используя достаточно интенсивный световой пучок, полученный, например, с помощью мощного лазера, наблюдать аналогичные рассмотренным здесь явления?

Задание 42. Все фотографии ультразвуковых фонтанов на границах раздела жидкостей получены нами при использовании в качестве источников ультразвука пьезоэлектрических излучателей на частоты 1 и 3 МГц. Мы не ставили аналогичных опытов с магнитострикционными излучателями. Попробуйте наблюдать описанные выше явления, используя высокочастотные магнитострикционные излучатели ультразвука.

УЛЬТРАЗВУКОВОЙ КАПИЛЛЯРНЫЙ ЭФФЕКТ

Мы уже не раз обращали ваше внимание на то, как важно экспериментатору постоянно развивать свою наблюдательность. В этом смысле очень поучительно познакомиться с открытием, сделанным в 1973 г. академиком Е. Г. Коноваловым. Можно почти с полной уверенностью утверждать, что десятки ученых не раз наблюдали явление, лежащее в основе открытия, и только Коновалов, исследовав это явление, показал его принципиальную новизну.

Разберемся в сущности открытого советским ученым ультразвукового капиллярного эффекта. Если в жидкость над вибратором ультразвукового излучателя опустить капилляр, то уровень жидкости в трубке будет выше, чем вне ее. Эффект капиллярного подня-

тия жидкости хорошо вам известен из школьного курса физики и объясняется действием сил поверхностного натяжения.

Если теперь включить ультразвук, то столбик жидкости в капилляре станет еще выше. И это явление нетрудно объяснить: ультразвуковая волна оказывает радиационное давление на поверхность жидкости в капилляре, и, поскольку оно направлено в сторону, противоположную направлению силы тяжести, жидкость поднимется по капилляру. Если уровень жидкости в капилляре при включении ультразвука изменился на высоту h (рис. 82), то радиационное давление, очевидно, равно

$$S = \rho gh,$$

где ρ — плотность жидкости, а g — ускорение свободного падения. По известному радиационному давлению можно вычислить интенсивность ультразвука

$$I = \frac{1}{2}Sc = \frac{1}{2}\rho ghc. \quad (52)$$

Таким образом, пользуясь капилляром, можно измерить интенсивность ультразвука.

Этот метод измерения интенсивности давно известен и хорошо изучен. Что же нового обнаружил Коновалов в той области, где казалось бы все известно?

Оказывается, что при определенных условиях жидкость в капилляре поднимается под действием ультразвуковой волны на высоту, в десятки и сотни раз превышающую ожидаемую при действии только радиационного давления!

Поставьте опыты, подтверждающие существование ультразвукового капиллярного эффекта. На столе вертикально расположите магнестрикционный излучатель, на вибраторе которого укреплена чашечка. В чашечку налейте воду и опустите в нее, не касаясь вибратора, стеклянную трубку внутренним диаметром 0,5—2 мм. Включив генератор, получите ультразвук максимальной интенсивности. Вы заметите, что при

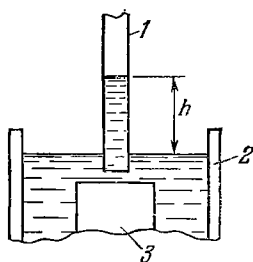


Рис. 82. К измерению радиационного давления с помощью капилляра.

1 — капилляр, 2 — сосуд с жидкостью, 3 — конец ферритового вибратора низкочастотного излучателя.

Этом столбик воды в капилляре поднимается на высоту не более 1—3 мм. По формуле (52) нетрудно рассчитать, что такому изменению уровня воды соответствует интенсивность ультразвука менее 1 Вт/см². Этот результат неплохо согласуется с теми, которые вы получили, измеряя интенсивность ультразвука в воде с помощью радиометра.

Теперь прикоснитесь концом трубки к вибратору и постепенно перемещайте его по торцу. При необходимости слегка подстройте генератор. Вы обнаружите,

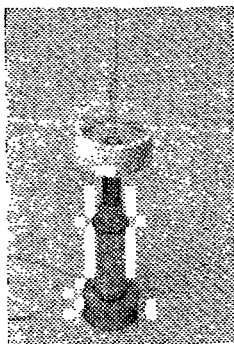


Рис. 83. Опыт по ультразвуковому капиллярному эффекту.

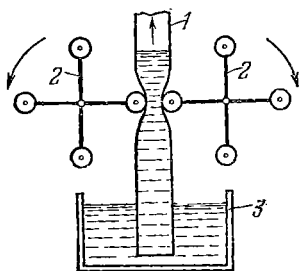


Рис. 84. К возможному объяснению физической сущности ультразвукового капиллярного эффекта.

Стенки эластичной трубки 1 периодически сжимаются и разжимаются благодаря давлению со стороны вращающихся валков 2. При этом жидкость из сосуда 3 поднимается по трубке.

как вдруг рывками столбик воды в капилляре начнет расти и через несколько секунд поверхность жидкости окажется на высоте 50—60 мм (рис. 83).

Если вы удачно подберете капилляр, вибратор излучателя и хорошо настроите генератор, то сумеете добиться поднятия воды до высоты 20—30 см! Это, безусловно, новый эффект, который нельзя объяснить одним лишь радиационным давлением.

Чем же объясняется столь неожиданное действие ультразвуковой волны? По-видимому, следует предположить, что здесь существенную роль играют ультразвуковые колебания капилляра. Можно предста-

вить себе, что при радиальных колебаниях стенки трубки, периодически сжимаясь и разжимаясь, действуют как своеобразный ультразвуковой насос. Обратитесь к рис. 84, на котором изображен насос из резиновой трубки, сжимаемой вращающимися валиками. Если предположить, что в стенках капилляра устанавливается стоячая волна, то не будет ли она «работать» подобно этому насосу?

Задание 43. Используя ультразвуковой капиллярный эффект, постройте «ультразвуковой водопровод» — устройство, в котором вода непрерывно поднималась бы по трубке вверх в течение всего времени работы излучателя.

Задание 44. Пользуясь капилляром, сравните радиационные давления, создаваемые в воде параллельным и сфокусированным с помощью линзы ультразвуковыми пучками.

УЛЬТРАЗВУКОВАЯ КАВИТАЦИЯ

При распространении ультразвуковой волны даже сравнительно небольшой интенсивности (всего несколько ватт на квадратный сантиметр) в жидкости возникает переменное звуковое давление, амплитуда которого достигает порядка нескольких атмосфер. Под действием этого давления жидкость попеременно испытывает сжатие и растяжение. Вы прекрасно знаете, что жидкость без существенного изменения ее свойств можно сильно сжать. Иначе обстоит дело, если в жидкости создать разрежение: уже простое уменьшение давления над водой приводит к закипанию — парообразованию внутри воды.

Нечто аналогичное происходит и при распространении ультразвуковой волны в жидкости: растягивающие усилия в области разрежения волны приводят к образованию в жидкости разрывов, т. е. мельчайших пузырьков, заполненных газом и паром. Эти пузырьки получили название кавитационных, а само явление стали называть ультразвуковой кавитацией.

Кавитационные пузырьки в некоторой области жидкости возникают всякий раз, когда до этой области доходит фаза разрежения ультразвуковой волны.

Как правило, кавитационные пузырьки долго не живут: уже следующая за разрежением фаза сжатия приводит к захлопыванию большей их части. Поэтому кавитационные пузырьки исчезают практически сразу вслед за прекращением облучения жидкости ультразвуком.

При захлопывании кавитационного пузырька возникает ударная волна, развивающая громадные давления. Если ударная волна встречает на своем пути препятствие, то она слегка разрушает его поверхность. Поскольку кавитационных пузырьков много и захлопывание их происходит много тысяч раз в секунду,

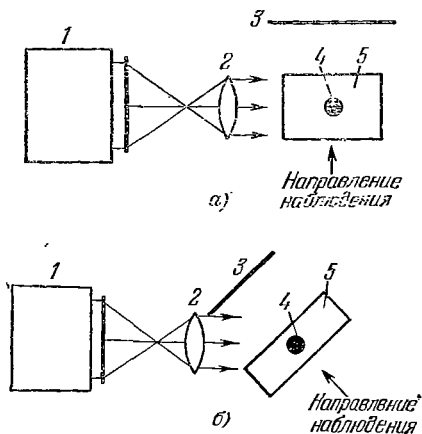


Рис. 85. Схемы установок для визуального наблюдения ультразвуковой кавитации перпендикулярно к световому пучку (а) и под углом к нему (б).

1— проекционный аппарат, 2— объектив, дающий параллельный пучок света, 3— темный фон (лист черной бумаги), 4— вибратор низкочастотного магнитострикционного излучателя, 5— прозрачная кювета с дистиллированной водой.

кавитация может произвести значительные разрушения.

Собственно кавитация была впервые обнаружена при изучении быстрого движения твердых тел внутри жидкости. Огромную разрушающую силу этого явления почувствовали в первую очередь инженеры, испытывающие гребные винты судов. При большой скорости вращения лопастей винта происходит образование кавитационных пузырьков, аналогичное тому, которое

имеет место при распространении ультразвуковой волны. Кавитация приводит к разрушению материала, из которого изготовлены гребные винты. В этом смысле кавитация — вредное явление.

Однако создание ультразвуковых генераторов сделало возможным управление кавитационным процессом, а значит, и полезное применение его на практике.

Для непосредственного наблюдения ультразвуковой кавитации соберите установку по схеме, изображенной на рис. 85. Перед темным фоном расположите склеенную из оргстекла (или изготовленную иным способом) прямоугольную кювету размером $30 \times 60 \times 80$ мм³ и осветите ее сбоку параллельным пучком света, выходящим из объектива проекционного аппарата. В кювету налейте дистиллированную воду и погрузите в нее на глубину порядка 1 см вибратор магнитострикционного излучателя, обеспечивающего получение ультразвука низкой частоты. Наблюдения проводите в направлении, перпендикулярном к направлению распространения светового пучка.

Включите генератор и настройте его в резонанс с вибратором. При этом возникает резкий шипящий звук — уже знакомый вам кавитационный шум — и вблизи торца вибратора появляется небольшое белесоватое облачко, состоящее из кавитационных пузырьков (рис. 86). Выключите генератор; кавитационное облачко и шум немедленно пропадают. Из опыта следует, что появление шума при работе вибратора в жидкости непосредственно связано с появлением кавитационного облачка.

Белесоватое облачко, которое вы наблюдали на опыте, состоит из мельчайших кавитационных пузырьков, видимых непосредственно глазом на темном фоне благодаря тому, что они сильно рассеивают свет. Характерный шум, появляющийся и исчезающий вместе с облачком, объясняется примерно тем же, что и шипение воды в чайнике перед ее закипанием: захлопываясь, кавитационные пузырьки порождают звуковые импульсы в большом диапазоне частот, т. е. шум. Мгновенное исчезновение кавитационного облачка при выключении ультразвука свидетельствует о том, что в опыте наблюдается истинная кавитация. Существует явление ультразвуковой дегазации

жидкости, при котором под воздействием ультразвука также появляются пузырьки, но не исчезающие сразу по выключении ультразвука и, следовательно, не имеющие ничего общего с кавитационными.

Внимательно рассмотрите кавитационное облачко. Расположите вибратор излучателя в воде под углом около 45° к горизонту так, чтобы сбоку был виден его торец. Вы заметите, что кавитационное облачко неоднородно: вблизи центра торца оно имеет вид

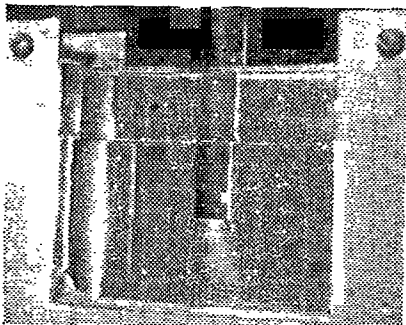


Рис. 86. Кавитационное облачко вблизи торца вибратора.

Фотография получена в опыте, поставленном по схеме, изображенной на рис 85, б. Применявшаяся в опыте кювета состоит из двух стеклянных пластинок, между которыми проложена прокладка из резиновой трубки и которые сжаты по периметру с помощью обоймы из дюрала и четырех болтов с гайками. В опыте можно использовать просто стакан или пробирку (глаз гораздо лучше замечает явления, чем объектив фотоаппарата).

небольшой плотной области; по плоскости торца кавитационные пузырьки распределяются в виде своеобразной, похожей на многоконечную звезду фигуры.

Удалите из каркаса обмотки возбуждения вибратор излучателя и мелкой шкуркой тщательно зачистите его торец. Погрузите вибратор зачищенным концом в воду и добейтесь появления ультразвуковой кавитации. После пятиминутной работы излучателя при максимальной интенсивности ультразвука выньте из каркаса вибратор и рассмотрите его торец. По всей поверхности торца вы обнаружите более или менее сильные разрушения: на торце оказывается как бы выгравированной та звездообразная фигура, которую вы наблюдали раньше в опыте с кавитационным об-

лачком. Результат опыта свидетельствует об огромной разрушающей силе ультразвуковой кавитации.

Получите кавитационное облачко в кювете, заполненной глицерином. Выключите в комнате свет и, подождав несколько минут, чтобы глаза привыкли к темноте (адаптировались на темноту), посмотрите в направлении торца вибратора. Вы заметите небольшую светящуюся область синеватого оттенка. Из опыта следует, что некоторые жидкости люминесцируют под действием ультразвука. Обнаруженное вами явление так и называется: сонолюминесценция.

Теория этого интересного явления разработана еще далеко не полностью. Согласно одной из гипотез сжатие кавитационных пузырьков при захлопывании приводит к сильному нагреванию и свечению содержащегося в них газа. По другой гипотезе свечение газа в кавитационных пузырьках обусловлено электрическими разрядами. Одно ясно: сонолюминесценция непосредственно связана с ультразвуковой кавитацией.

Чтобы опыт по наблюдению сонолюминесценции прошел без особых осложнений, дадим несколько советов. Свечение глицерина под действием ультразвука незначительно по яркости, поэтому вначале вам его будет трудно обнаружить. Дело осложняется еще и тем, что в полной темноте нет привычных ориентиров и трудно направить взгляд туда, куда нужно. Чтобы облегчить наблюдения, на свету перед кюветой расположите лупу, через которую будет виден торец вибратора (рис. 87). Далее, получив в полной темноте ультразвук максимальной интенсивности, приблизьте глаз к лупе. После того как вы увидите люминесценцию глицерина в виде синеватого свечения, лупу можно убрать. Более того, когда вы будете точно знать, что нужно увидеть, вы сумеете обнаружить сонолюминесценцию и при сравнительно плохом затемнении.

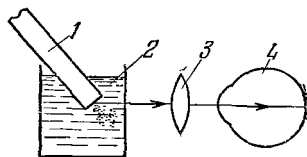


Рис. 87. Схема установки для наблюдения сонолюминесценции.

1—вибратор низкочастотного излучателя, 2—кювета с глицерином, 3—лупа, наведенная на торец вибратора, 4—глаз наблюдателя.

Вы уже убедились, что кавитация является одной из важнейших физических причин ряда явлений, которые происходят в жидкости при облучении ее ультразвуком. К одному из таких явлений относится ускорение химических реакций под действием ультразвука.

Разотрите 0,5 г крахмала, слегка увлажненного водой, в тонкую пасту и введите ее при непрерывном помешивании в 200 мл кипящей воды. Кипятите раствор несколько минут и затем охладите до комнатной температуры. В стеклянный пузырек налейте равные порции приготовленного раствора крахмала, 20%-ного раствора йодистого калия и добавьте туда каплю четыреххлористого углерода. Пузырек закройте пробкой и, сильно встряхивая и взбалтывая его содержимое, добейтесь равномерного распределения в растворе четыреххлористого углерода. Полученным составом заполните до высоты 1—2 см тонкостенную пробирку.

На поверхность вибратора несимметричного магнитострикционного излучателя, обеспечивающего получение ультразвука частотой 1 МГц, нанесите каплю трансформаторного или иного масла. Пробирку с приготовленным составом поместите ее дном в каплю. Включите генератор и настройте его в резонанс с вибратором. Спустя 20—40 с после начала облучения мутный белесоватый раствор в пробирке станет темно-фиолетовым.

Результат опыта объясняется тем, что при облучении ультразвуком водного раствора четыреххлористого углерода в нем образуется свободный хлор, который замещает в йодистом калии йод. Выделяющийся при этом йод взаимодействует с крахмалом и окрашивает раствор в синий или фиолетовый цвет. Экспериментально установлено, что реакция наиболее интенсивно протекает при частотах порядка 300 кГц, причем выделение йода происходит в пучностях давлений стоячей ультразвуковой волны, возникающей в растворе.

Задание 45. Поместив рядом с работающим в воде излучателем тонкую алюминиевую фольгу, еще раз докажете разрушающее действие ультразвуковой кавитации. Повторите опыт, используя вместо воды 10%-ный раствор едкого калия. Сравните результаты экспериментов.

Выше неоднократно отмечалось, что ультразвуковая волна представляет собой сжатия и разрежения, распространяющиеся в упругой среде. Можно ли непосредственно с помощью соответствующего эксперимента доказать это утверждение?

Пусть ультразвуковая волна распространяется в жидкости. Тогда в областях сжатия плотность жидкости возрастает, а в областях разрежения — уменьшается. Чем выше плотность жидкости, тем больше ее показатель преломления, характеризующий так называемую оптическую плотность. Таким образом, распространение ультразвуковой волны приводит к периодическому — в пространстве и во времени — изменению показателя преломления жидкости. Однородная жидкость под действием ультразвука становится оптически неоднородной. Один из основных законов оптики утверждает, что свет в однородной среде распространяется прямолинейно. В оптически неоднородной среде при распространении света в общем случае наблюдается явление дифракции — отступление от прямолинейности распространения света. Следовательно, если в эксперименте удастся обнаружить дифракцию света на оптических неоднородностях, обусловленных прохождением ультразвука через жидкость, тем самым будет доказано существование этих неоднородностей или, иными словами, непосредственно будет доказано, что ультразвуковая волна представляет собой сжатия и разрежения, распространяющиеся в жидкости.

Получить такое экспериментальное доказательство можно с помощью установки, оптическая и акустическая схема которой изображена на рис. 88. В фокальной плоскости линзы L_1 расположен линейный источник света, параллельный фронту ультразвуковой волны, распространяющейся в кювете с жидкостью. Через кювету проходит параллельный световой пучок, собираемый линзой L_2 на белом экране \mathcal{E} , расположенном в ее фокальной плоскости.

В отсутствие ультразвука жидкость в кювете однородна, и согласно законам геометрической оптики линия S' на экране является изображением линейного

источника S . Если на ультразвуковой волне происходит дифракция света, то при включении ультразвука вокруг изображения источника света S' на экране \mathcal{E} должна наблюдаться соответствующая дифракционная картина. Выясним, какую дифракционную картину следует ожидать на экране.

Если в жидкости перпендикулярно к световому пучку распространяется ультразвуковая волна, то в ней возникают отстоящие друг от друга на длину волны области сжатий и соответственно разрежений. Поскольку скорость света в жидкости значительно превышает скорость звука, сжатия и разрежения среды можно считать неподвижными. Таким образом, для

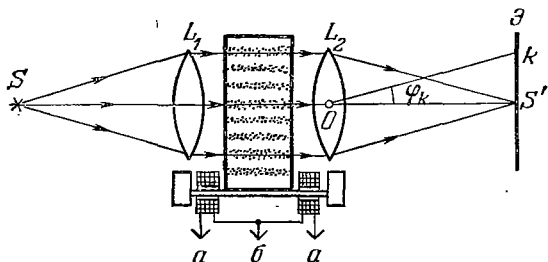


Рис. 88. Схема установки для наблюдения дифракции света на ультразвуковой волне.

Магнестрикционный излучатель ультразвука высокой частоты может быть расположен как внутри, так и вне кюветы (в последнем случае должен быть обеспечен акустический контакт между вибратором и стенкой кюветы).

света кювета с жидкостью, в которой возбужден ультразвук, представляет собой периодическую в пространстве структуру изменений показателя преломления. Световые волны, проходя через области сжатия, имеющие бóльший показатель преломления, отстают от волн, проходящих через области разрежения с более низким показателем преломления. В результате, если на жидкость в кювете падает плоская световая волна, из кюветы выходит волна, имеющая сложный фронт, периодически изменяющийся в направлении распространения ультразвука.

Обычная дифракционная решетка, которую вы изучаете в школьном курсе физики, состоит из параллельных равноотстоящих друг от друга щелей, разделенных непрозрачными промежутками. Такая решетка

не изменяет фронта световой волны: если на нее падала плоская волна, то непосредственно за решеткой она остается плоской. Однако амплитуда световой волны после прохождения дифракционной решетки изменяется: она становится равной нулю за непрозрачными промежутками решетки и остается прежней за щелями. Таким образом, обычная дифракционная решетка приводит к периодическому изменению амплитуды световой волны вдоль ее фронта (если плоская световая волна падает на решетку нормально). Такую дифракционную решетку принято называть амплитудной.

Если монохроматический свет проходит через амплитудную решетку, то дифракционная картина на экране представляет собой семейство изображений источника света, отстоящих друг от друга на одинаковые расстояния (предполагается, что наблюдения производят на установке, собранной по схеме рис. 88, в которой вместо кюветы с жидкостью находится дифракционная решетка). Эти изображения называются главными максимумами дифракционной картины. Положение их на экране определяется хорошо известной формулой

$$d \sin \varphi_k = k\lambda_c, \quad k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \quad (53)$$

где d — период дифракционной решетки, φ_k — направление на k -й максимум интенсивности (угол между максимумом нулевого и k -го порядка), λ_c — длина световой волны.

Ультразвуковая волна изменяет фронт световой волны, проходящей через жидкость. Вспомнив, что фронтом волны называется поверхность равной фазы, заключаем, что наличие ультразвука в кювете с жидкостью приводит к периодическому изменению фазы вдоль «условного фронта» световой волны. Любая волна, в том числе и световая, характеризуется тремя параметрами: амплитудой, фазой и частотой. Поскольку волна — единый реальный процесс, трудно допустить, что периодическое изменение одного из этих параметров не влечет за собой соответствующего изменения двух других. Поэтому разумно предположить, что раз устройство, периодически изменяющее амплитуду световой волны вдоль ее фронта, является

амплитудной дифракционной решеткой, то устройство, периодически изменяющее фазу волны, является фазовой дифракционной решеткой. Ультразвуковая волна в кювете с жидкостью тогда, очевидно, может выполнять роль фазовой дифракционной решетки. Период такой решетки будет равен длине волны ультразвука.

Допустив, что ультразвуковая волна в жидкости является фазовой решеткой и действует аналогично амплитудной, можно считать, что положение максимумов интенсивности дифракционной картины на экране определяется формулой, аналогичной формуле (53),

$$\lambda \sin \varphi_k = k\lambda_c, \quad k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \quad (54)$$

где λ — длина ультразвуковой волны в жидкости (период фазовой решетки).

Приведенные рассуждения не имеют доказательной силы. Они совершенно беззащитны: можно указать немало убедительных доводов против этих рассуждений. Но они бесполезны потому, что предполагают дальнейшую постановку эксперимента. Опыт покажет, существует дифракция света на ультразвуковой волне или нет. Опыт подтвердит или опровергнет справедливость формулы (54). Опыт уточнит предварительные представления об ожидаемом явлении, которые, безусловно, неполны. Одним словом, только опыт позволит продвинуться дальше.

Эксперимент по обнаружению дифракции световой волны на ультразвуковой можно поставить следующим образом (рис. 89). Перед конденсором проекционного аппарата в том месте, где сходятся световые лучи, расположите щель регулируемой ширины. С помощью объектива получите изображение щели на экране, находящемся на расстоянии 2—4 м от объектива. В этой установке объектив заменяет обе линзы L_1 и L_2 , изображенные на рис. 88. Перед объективом расположите плоскопараллельную кювету из оргстекла, в которой вертикально укреплен магнито-стрикционный излучатель на частоту 8—12 МГц (см. рис. 38). В кювету налейте чистый керосин, включите генератор и настройте его в резонанс с вибратором излучателя. Вы увидите, как по обе стороны от центрального белого максимума (изображения щели) по-

являются симметрично расположенные слегка окрашенные дифракционные максимумы интенсивности (рис. 90). При хорошей наладке установки можно наблюдать до 5 максимумов по обе стороны от центрального.

Для получения дифракционной картины достаточно большой яркости нужно установить излучатель так, чтобы его вибратор был параллелен противоположной стенке кюветы. При этом в жидкости образуется стоячая ультразвуковая волна и амплитуда давлений в ней в два раза больше, чем в бегущей волне. Поэтому изменения показателя преломления выражены



Рис. 89. Установка для наблюдения дифракции света на ультразвуковой волне.

1—проекторный аппарат, 2—раздвижная щель, 3—объектив, 4—кювета с жидкостью и магнитострикционным излучателем, 5—столлик.

резче и дифракционная картина имеет большую яркость. Периоды же дифракционных решеток, образованных стоячей и бегущей ультразвуковыми волнами, одинаковы, поскольку, как уже отмечалось, свет проходит жидкость в кювете за ничтожно малое время и бегущую волну при этом можно считать неподвижной.

Непосредственно убедиться в справедливости последнего утверждения можно, поставив следующий изящный опыт. Получите стоячую ультразвуковую волну в кювете с водой и отметьте на экране расстояния между дифракционными максимумами. После этого взболтайте в воде очень небольшое количество крахмала. Вы увидите, как яркость дифракционной картины возрастет (если крахмала будет чрезмерно много, она уменьшится из-за поглощения света

суспензией), а расстояние между дифракционными максимумами на экране увеличится вдвое.

Объясняется этот результат тем, что крахмал коагулирует в пучностях смещений стоячей волны, отстоящих друг от друга на половину длины волны ультразвука в жидкости. Следовательно, добавление в воду крахмала уменьшает период дифракционной решетки вдвое и согласно формуле (54) вдвое должно возрасти расстояние между дифракционными максимумами. Увеличение яркости дифракционной картины

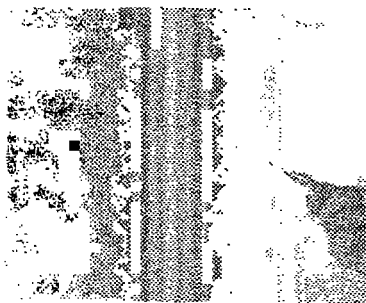


Рис. 90. Дифракционная картина.

Экран, на котором наблюдаются максимумы интенсивности, на самом деле белый. Однако, чтобы фотография получилась достаточно контрастной, при печати ее левую часть пришлось «передержать» (дать большую экспозицию, чем правой части).

обусловлено тем, что добавление крахмала превращает сравнительно «слабую» фазовую (точнее, фазово-амплитудную) решетку в «сильную» амплитудную.

Задание 46. Дифракция света на ультразвуковой волне в научных исследованиях часто используется для измерения скорости звука в жидких и твердых прозрачных средах. Разработайте и изготовьте прибор для измерения скорости звука в жидкостях таким методом.

Задание 47. Пользуясь в качестве вибратора магнитострикционного излучателя слегка клиновидной ферритовой пластинкой, средняя толщина которой лежит в пределах 0,2—0,4 мм, исследуйте зависимость расстояния между максимумами дифракционной картины от частоты ультразвука.

1.

1. В опыте можно использовать любой усилитель низкой частоты чувствительностью не хуже 3,5 мВ. Вместо лампочки к выходу усилителя можно подключить динамик. Тогда при ударе о ферритовый стержень из динамика будет слышен щелчок.

2. Опыт не столь прост, как может показаться на первый взгляд: нужно потренироваться, чтобы достичь требуемого эффекта.

Если держать трубку не за середину, то возбудить трением ее колебания практически не удастся. Объясняется это тем, что при трении в трубке устанавливается стоячая волна, причем в середине трубки образуется узел, а по краям — пучности смещений (трубка возбуждается на основной собственной частоте). Закрепление середины трубки не приводит к перераспределению в ней напряжений, и поэтому трубка колеблется так, как если бы она была свободна. Если трубка закреплена не за середину, а в любом другом месте, то возбудить ее колебания на основной частоте невозможно, поскольку в месте закрепления должен быть расположен узел смещений устанавливаемой в трубке стоячей волны. Казалось бы, при таком креплении ничто не мешает колебаться трубке на соответствующей гармонике. Однако амплитуды колебаний высших порядков меньше амплитуды основного колебания, поэтому, как правило, и не происходит звучания трубки на более высокой частоте, чем основная.

Обрезая трубку и трением возбуждая колебания получающихся отрезков, легко убедиться, что более короткая трубка издает звук более высокой частоты. Сравнительно нетрудно добиться звучания трубок длиной 25—30 см; частота колебаний при этом

находится уже вблизи верхней границы звукового диапазона.

3. Сделать это можно, надев вблизи нижнего торца на вибратор резиновое колечко и вставив вибратор с колечком в каркас обмотки возбуждения. При настройке генератора в резонанс с излучателем вибратор будет по-прежнему совершать колебания на основной частоте, но амплитуда их значительно уменьшится.

Опыт можно поставить и иначе. Нанесите на верхний торец вибратора каплю воды и включите генератор — при этом капля немедленно расплывется. Вновь повторите опыт, сильно сжав вибратор вблизи его верхнего конца. Теперь уже при включении ультразвука капля с торца вибратора не расплывается.

4. Табличные значения скорости звука в никелевом стержне и модуля упругости никеля соответственно равны $c = 4785$ м/с, $k = 20\,540$ кГ/мм². При тщательной постановке опыта можно получить значения этих величин, близкие к указанным. Основная погрешность измерения обусловлена малой точностью определения резонансной частоты вибратора: шкала генератора типа ГЗШ-63 отградуирована довольно грубо.

5. Полученные экспериментально значения длин никелевых вибраторов, возбуждаемых на их основной собственной частоте, для ряда фиксированных частот приведены в табл. 2. Аналогичную таблицу можно составить и путем соответствующего расчета.

Таблица 2

f , кГц	15	20	25	30	40	45	50
l , мм	163	122	98	82	61	54	49

Вырежьте из листа никеля полоску шириной 10—15 мм, длина которой имеет наибольшее из приведенных в таблице значение, и, слегка изогнув ее вдоль для придания необходимой жесткости, поместите внутрь каркаса обмотки возбуждения излучателя так, чтобы она стояла на магнитах. Магниты при этом

следует снять с выступающей части катушки возбуждения и поместить под нижнее отверстие каркаса обмотки. Перемещая настроечный сердечник высокочастотного трансформатора, добейтесь резонанса — дребезжания вибратора о магниты. Сделайте отметку на сердечнике, соответствующую указанной в таблице основной собственной частоте использованного в опыте вибратора. Затем укоротите никелевый вибратор, обрезав его ножницами так, чтобы его длина стала соответствовать следующей приведенной в таблице резонансной частоте, и вновь повторите опыт. Действуя таким образом, полностью отградуируйте генератор. Вслед за этим сделайте из бумаги шкалу и наклейте ее липкой прозрачной лентой непосредственно на настроечный сердечник высокочастотного трансформатора.

Отградуировать самодельный ультразвуковой генератор можно и с помощью ферритовых вибраторов разной длины.

Разумеется, описанный способ градуировки прибора по частоте не может претендовать на слишком большую точность. Однако знание даже приблизительного значения частоты ультразвука позволит вам — особенно на первых порах — увереннее ориентироваться в целом ряде опытов.

8. В магнитострикционном излучателе вместо круглого можно использовать плоский ферритовый стержень. Излучатель с плоским вибратором отличается от описанного только конструкцией каркаса обмотки возбуждения.

С таким излучателем можно поставить довольно много опытов, но он менее удобен, чем излучатель с круглым вибратором; например, плоский вибратор имеет прямоугольную по форме излучающую поверхность, и его сложнее закрепить так, чтобы можно было без значительных потерь ввести ультразвук в жидкость, и т. д. Тем не менее, если вы не сможете сразу достать для магнитострикционного излучателя круглый ферритовый вибратор, следует использовать в опытах излучатель с плоским стержнем. Нужно только иметь в виду, что условия опытов зачастую придется подбирать самостоятельно.

9. В одной обмотке возбуждения магнитострикционного излучателя можно расположить несколько ферритовых стержней размером $3 \times 20 \times 100$ мм³. Если склеить, например, три таких стержня клеем БФ-2, то получится «монолитный» вибратор с довольно большой площадью торца (9×20 мм²).

Недостаток подобного вибратора состоит в том, что если при настройке генератора в резонанс с излучателем произойдет излом хотя бы одного стержня, то весь вибратор выйдет из строя.

10. Никелевый вибратор в магнитострикционном излучателе описанной конструкции менее выгоден, чем ферритовый, потому что при работе излучателя никелевый вибратор сильно нагревается и дает ультразвук значительно меньшей интенсивности, чем ферритовый. В этом нетрудно убедиться на опыте.

11. Для получения с помощью данного излучателя ультразвука максимальной интенсивности напряженность постоянного магнитного поля должна иметь некоторую оптимальную величину: и увеличение, и уменьшение поляризуемого вибратор поля по сравнению с оптимальным ведет к снижению интенсивности ультразвука.

Вообще, если в каком-либо опыте необходимо получить ультразвук максимальной интенсивности, то, помимо прочего, при настройке генератора в резонанс с излучателем, находящимся в рабочем положении, нужно подобрать и величину подмагничивающего вибратор поля.

12. В этом опыте при настройке генератора в резонанс с вибратором линейка начинает быстро «уходить» из-под торца вибратора. Результат опыта объясняется тем, что благодаря прерывистому контакту между торцом вибратора и линейкой на нее периодически действует сила, направленная от вибратора и преодолевающая силу трения между линейкой и поверхностью, на которой она лежит.

13. В опыте наблюдается быстрое вращение диска. Объясняется этот опыт так же, как и предыдущий.

14. Для поляризации вибратора можно использовать вместо постоянного переменный ток частотой 50 Гц и напряжением 6,3 В. Схема приставки для поляризации вибратора в принципе не отличается от

изображенной на рис. 16; при наладке нужно только правильно подобрать сопротивление резистора R_1 .

15. С помощью лампового генератора можно возбуждать колебания ферритовых вибраторов без дополнительного их подмагничивания. При этом, поскольку частота колебаний вибратора без подмагничивания в два раза больше частоты переменного тока, проходящего по обмотке возбуждения, в излучателе без подмагничивания можно использовать ферритовый вибратор максимальной длины порядка 80 мм (напомним, что ламповый генератор настроен так, что он может возбуждать ультразвуковые колебания ферритового вибратора максимальной длины 160 мм).

16. При экспериментальном исследовании магнитострикционных излучателей без подмагничивания вибраторов в качестве каркасов обмоток возбуждения удобно использовать стеклянные трубки внутренним диаметром около 9 мм, на концы которых надеты резиновые колечки шириной 4—5 мм. На каркас выбранной длины намотайте 100—150 витков провода ПЭЛ 0,31, не заботясь особенно о качестве получившейся обмотки. Излучатель подсоедините к выходу лампового ультразвукового генератора и, расположив его вертикально на столе, нанесите на верхний торец ферритового вибратора каплю воды. Настройте генератор в резонанс с вибратором и, отмазывая витки обмотки возбуждения, добейтесь ультразвуковых колебаний максимальной интенсивности. При этом капля на торце должна мгновенно расплыться.

Такая работа, проделанная с ферритовыми вибраторами разной длины, покажет, что для возбуждения ультразвуковых колебаний вибраторов без подмагничивания весьма существенны как число витков, так и длина намотки катушки возбуждения. Например, для возбуждения ферритовых вибраторов длиной 60 и 35 мм обмотки возбуждения должны соответственно состоять из 90 и 50 витков провода ПЭЛ 0,8, намотанных на длину 20 и 15 мм.

Магнитострикционный излучатель без подмагничивания позволяет получить ультразвук частотой до примерно 100 кГц. Интенсивность колебаний,

которая при этом может быть достигнута, такова, что ненагруженные ферритовые вибраторы в воздухе нередко разрываются на части.

Недостатком такого излучателя является то, что его обмотка возбуждения и сам вибратор сильно нагреваются. Тем не менее магнитострикционный излучатель без подмагничивания удобно использовать во многих опытах по ультразвуку.

17. Нельзя, потому что обмотка возбуждения излучателя средней частоты имеет небольшое число витков и для получения необходимого магнитного поля нужно пропустить по ней значительный ток, а это приводит к сильному нагреванию обмотки и быстрому выходу ее из строя.

18. Для подмагничивания вибратора излучателя, обеспечивающего получение ультразвука средней частоты, можно использовать электромагнит, состоящий из железного сердечника диаметром 20 мм и длиной 50 мм и катушки, содержащей примерно 500 витков провода ПЭЛ 0,51. Оптимальное значение тока подмагничивания в этом случае будет составлять около 1—1,5 А.

19. Опыт показывает, что длина изгибающей волны не зависит от расстояния между торцом излучателя и краем бумажного листа. Скорость изгибающей волны зависит от частоты. В этом нетрудно убедиться, если использовать в опыте излучатели, вибраторы которых имеют разную длину. Тщательная постановка этой серии опытов позволит вам доказать, что скорость изгибающей волны пропорциональна корню квадратному из частоты.

20. Внешний вид экспериментальной установки изображен на рис. 91. Трубка зажата посередине в лапке универсального штатива и слегка касается своим нижним концом листа бумаги, лежащего на поролоновой «подушке». При возбуждении продольных колебаний трубки трением на листе получают интерференционные картины, подобные тем, которые образуются в опытах с ультразвуковым излучателем (рис. 92). Для успешной постановки опыта важно научиться уверенно возбуждать звуковые колебания трубки. В опыте удобно использовать стеклянные трубки диаметром 6 мм и длиной 30—40 см.

21. Чтобы получить когерентные излучатели, возьмите две совершенно одинаковые обмотки возбуждения и подключите их одновременно к выходу одного и того же ультразвукового генератора. Вставьте в каркасы обмоток ферритовые вибраторы одинаковой длины и подмагнитьте их полем, создаваемым одинаковым числом магнитов. Попытайтесь настроить ультразвуковой генератор в резонанс с обоими вибраторами. Как правило, сразу это не удастся сделать: вибратор одного излучателя будет колебаться на чуть большей частоте, а другого — на немного меньшей. Постепенно стачивая с помощью наждачного круга вибратор, возбуждающийся на меньшей частоте, добейтесь того, чтобы оба вибратора колебались на одной частоте. В этом случае с помощью порошка марганцовокислого калия можно выявить устойчивую интерференционную картину на бумажном листе.

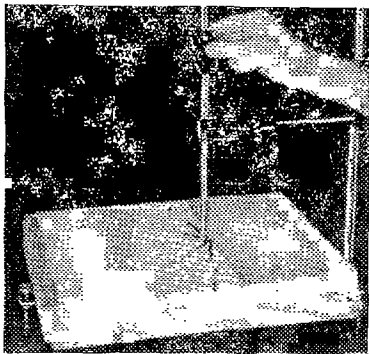


Рис. 91. Экспериментальная установка к заданию 20.

Если вибраторы колеблются в противофазе, то точно посередине между ними должен находиться минимум интенсивности. Изменяя порядок подключения к выходным клеммам генератора концов обмотки возбуждения одного из излучателей, можно добиться колебания вибраторов в фазе; при этом посередине между ними проходит максимум интенсивности.

В последних опытах лучше заострить концы ферритовых вибраторов, обтачивая их на наждачном круге.

22. В этом опыте для введения ультразвука в воду следует использовать способ, поясненный рис. 66.

23. Способ введения ультразвука в воду остается таким же, как в предыдущем опыте. Шарик, сделанный из припоя на концах тонких проволок,

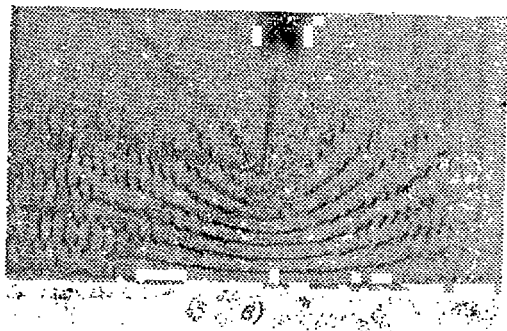
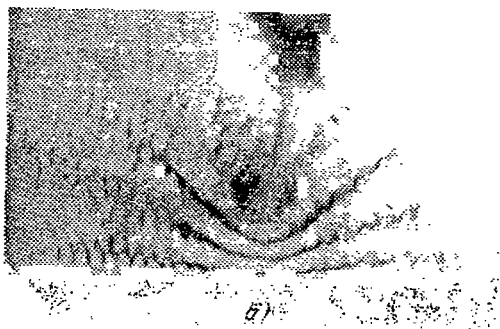
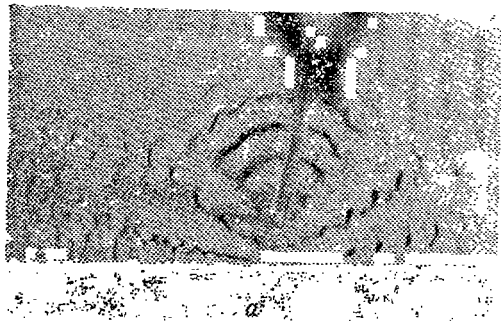


Рис. 92. Интерференционные картины, получающиеся при отражении изгибной волны от края бумажного листа.

Волна возбуждается стеклянной трубкой и имеет частоту, лежащую в звуковом диапазоне. Во всех опытах *а*, *б*, *в* использовалась одна и та же стеклянная трубка, изменялось только расстояние между ее концом и краем листа.

нужно расположить вблизи торца вибратора вдоль направления распространения ультразвуковой волны. Если расстояние между вибратором и ближайшим к нему шариком слишком мало, то наблюдаемое явление может осложниться притяжением этого шарика к вибратору. Таким образом, для успешной постановки опыта необходимо правильно подобрать его условия.

24. Налейте в блюдечко воды и расположите излучатель наклонно так, чтобы торец его вибратора оказался наполовину погруженным в воду. При настройке генератора в резонанс с вибратором вы будете наблюдать течение, как бы исходящее из торца. Если на поверхность воды поместить легкие плавающие тела, то они будут увлекаться этим течением.

25. Ликоподий следует насыпать тонким слоем на ровную поверхность перед вибратором излучателя. При включении ультразвука ликоподий будет сдуть ультразвуковым ветром.

26. В опыте вблизи вибратора получаются узловые линии, отличные от концентрических окружностей. Поскольку симметрия в условиях опыта сохранилась, результат свидетельствует о том, что скорость распространения звука в различных направлениях по текстолитовой пластинке различна. Текстолит изготавливается из ткани, пропитанной специальными смолами. Очевидно, скорость звука зависит от того, вдоль или поперек волокна распространяется звуковая волна.

27. Способ получения фигур Хладни в звуковом диапазоне понятен из рис. 93.

Опыты показывают, что в звуковом диапазоне частот явление дисперсии изгибных волн также существует. Например, при использовании в качестве источников стеклянных трубок длиной 30 и 60 см (внутренним диаметром 0,5 и внешним 4,5 мм) длины изгибных волн в дюралевом диске толщиной 1,7 мм (диаметром 120 мм) оказались равными соответственно $\lambda_1 = 34,5$ мм и $\lambda_2 = 50,5$ мм. Их отношение $\lambda_2/\lambda_1 = 1,46 \approx \sqrt{2}$. Частота при этом меняется в два раза: одна стеклянная трубка вдвое длиннее другой. Таким образом, опыт подтверждает, что скорость

звуковой изгибной волны пропорциональна корню квадратному из частоты.

28. При определенных частотах капля воды на торце вибратора начинает колебаться и крахмал перераспределяется, обозначая узловые линии. В опыте можно наблюдать до 5—10 типов (их называют модами) колебаний, причем каждому из них соответствует своя картина узловых линий. Разнообразие этих картин удивительно, но еще более удивительно, что все они могут быть объяснены строгой теорией.

29. Крахмал на поверхности вибратора обозначает узловые линии, очень похожие на те, которые наблюдаются в опытах с фигурами Хладни. Из опыта

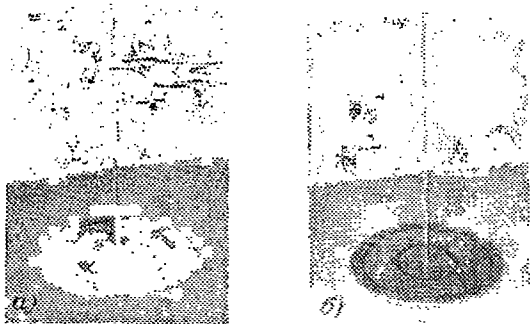


Рис. 93. Получение фигур Хладни на дюралевом диске при помощи стеклянных трубок длиной 30 (а) и 60 см (б).

следует, что вибратор магнестрикционного излучателя колеблется не поршнеобразно, а совершает сложное колебательное движение.

30. Ламповый генератор дает модулированные ультразвуковые колебания: ультразвук 50 раз в секунду появляется и исчезает. Поэтому распределение порошка в трубке Кундта усредняется так, что получается как бы «график» стоячей волны в трубке. Тонкие пылевые слои, поднимающиеся вверх от основания трубки, в опыте не образуются.

31. В опыте вы увидите, как с ростом интенсивности растут вспучивания на поверхности жидкости. Начиная с некоторого значения интенсивности ультразвука, во вспучиваниях происходит фонтанирова-

ние жидкости. Наконец, при максимальной интенсивности жидкость разбивается на слои, расположенные вертикально поперек трубки.

Для успешной постановки опыта существенна интенсивность стоячей волны, образующейся в трубке Кундта. С целью увеличения интенсивности в опыте можно использовать трубку не слишком большой длины и такого диаметра, чтобы зазор между ее стенками и вибратором излучателя был минимальным. Отражатель при этом должен иметь ровную поверхность, ориентированную, как и торец вибратора, строго перпендикулярно к оси трубки.

32. Изменения, которые нужно внести в конструкцию магнестрикционного излучателя ультразвука средней частоты, чтобы использовать его в модели ультразвукового интерферометра, понятны из рис. 94. Схему компенсации можно оставить прежней, но использовать ее для регистрации изменений анодного тока лампового генератора. Для этого схему компенсации следует

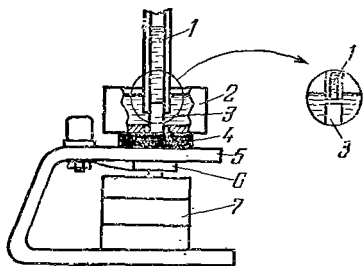


Рис. 94. Конструкция ультразвукового излучателя средней частоты, используемого в модели интерферометра

1—стеклянная трубка, 2—баночка с жидкостью, 3—ферритовый вибратор, 4—резиновый диск, в котором закреплен вибратор, 5—стойка излучателя, изготовленная из винипласта; 6—обмотка возбуждения, 7—магниты, поляризующие вибратор.

включить в разрыв провода, идущего к среднему отводу высокочастотного трансформатора. В ламповом генераторе происходит выпрямление переменного тока, поэтому в схеме компенсации можно использовать миллиамперметр, рассчитанный на измерение постоянного тока.

35. Стоячая волна в суспензии алюминиевой краски в ацетоне обозначается практически мгновенно. Поскольку длина ультразвуковой волны в этом опыте довольно велика (порядка нескольких сантиметров), трудно допустить, что частицы алюминиевой краски за ничтожно малый промежуток времени успеют перераспределиться между узлами и

пучностями. Поэтому единственно верным объяснением опыта является ориентирующее действие ультразвука.

Коагуляция гидрозолей требует заметно большего времени. Особенно отчетливо развитие процесса коагуляции во времени можно наблюдать, если получать стоячую волну в эмульсии керосина в воде.

36. В опыте образуется стоячая волна за счет интерференции волны, падающей на поверхность жидкости, и отраженной этой поверхностью волны (рис. 95). Эксперимент позволяет определить частоту магнитострикционного излучателя. С этой целью

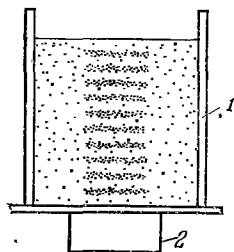


Рис. 95. Стоячая волна в суспензии крахмала в воде.

1—кювета с суспензией,
2—вибратор излучателя.

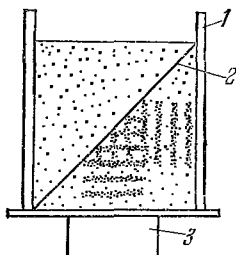


Рис. 96. Схема опыта к заданию 37.

1—кювета с суспензией крахмала в воде, 2—стеклянная пластинка, 3—вибратор излучателя. Стоячая волна образуется при отражении ультразвука от стенки кюветы.

необходимо измерить расстояние между 10—20 пучностями стоячей волны, вычислить длину ультразвуковой волны и по известной скорости звука в воде определить частоту.

37. В опыте можно наблюдать отражение ультразвуковой волны от стеклянной пластинки (рис. 96). Если стеклянную пластинку заменить пластинкой из оргстекла, то можно будет одновременно наблюдать отражение и прохождение волн через пластинку.

38. При использовании низкочастотного излучателя для получения стоячей волны в суспензии алюминиевой краски в ацетоне необходимо очень тщательно подобрать условия опыта. Аналогичные опыты с

ультразвуковыми излучателями средней и высокой частот очень просты и получаются всегда.

39. Излучатель с ферритовым вибратором длиной 40—50 мм дает значительно более интенсивную ультразвуковую волну, чем излучатель с вибратором длиной 160 мм. Об этом можно судить по величине отклонения крылышка радиометра. Поэтому вообще все опыты по радиационному давлению ультразвука в воздухе лучше производить с таким излучателем.

При постановке опытов не следует включать ультразвук на слишком большое время, так как это почти неизбежно приведет к разрыву ферритового вибратора на части.

41. Над небольшой алюминиевой баночкой закрепите стальной шарик и залейте баночку составом пластмассы «Протакрил» или эпоксидной смолой так, чтобы шарик был погружен в состав наполовину (рис. 97). После полимеризации пластмассы вы получите требуемую ультразвуковую линзу. Возможны и иные варианты изготовления ультразвуковых линз. Следует только

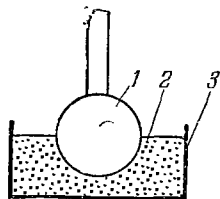


Рис. 97. Способ изготовления ультразвуковой линзы.

1—шарик от подшипника с держателем, 2—пластмасса «Протакрил», 3—баночка.

иметь в виду, что недостаточно тщательное приготовление составов приведет к появлению в теле линзы многочисленных воздушных пузырьков, которые сильно ослабят интенсивность ультразвука.

43. С этой целью можно использовать стеклянную трубку длиной 40—50 мм. Вода, поднимаясь по трубке вертикально вверх, будет переливаться через ее край (иногда даже фонтанируя) обратно в баночку, укрепленную на вибраторе.

45. В опыте можно использовать фольгу, в которую обертываются некоторые конфеты. В растворе едкого калия в течение нескольких секунд в фольге образуется отверстие по форме торца вибратора. Результат опыта объясняется совместным действием ультразвуковой кавитации и химической реакции между алюминием и щелочью.

Опыт показывает, что в воде разрушение фольги под действием кавитации происходит значительно

медленнее, чем в растворе щелочи. Поэтому можно сказать, что ультразвуковая кавитация повышает скорость некоторых химических реакций.

46. Такой прибор нетрудно построить, слегка переделав школьный спектроскоп. С этой целью нужно со столика спектроскопа удалить призму и вместо нее расположить плоскопараллельную кювету. Далее, заменив окуляр зрительной трубы десятикратной измерительной лупой, закрепить зрительную трубу так, чтобы ее ось совпала с осью коллиматора и была перпендикулярна к кювете. Ультразвук в жидкость лучше всего вводить через стенку кюветы. Частота магнитострикционного излучателя может быть выбрана в пределах 3—5 МГц.

В опытах с этим прибором непосредственно измеряется расстояние между дифракционными максимумами. Зная его и фокусное расстояние объектива зрительной трубы, можно вычислить углы φ_R , а затем определить длину ультразвуковой волны в жидкости. По измеренной длине волны и известной частоте можно вычислить скорость звука.

47. Этот опыт очень эффектен: изменяя частоту ультразвукового генератора, можно в довольно широких пределах «регулировать» расстояние между дифракционными максимумами. Опыт качественно показывает зависимость длины ультразвуковой волны от частоты.

Вот и закончилась эта небольшая книга. Вы познакомились с одним из способов получения ультразвука, изучили некоторые физические свойства и возможности практического использования ультразвуковых волн. Но это ли главное? Пожалуй, нет.

Неизмеримо важнее то, что, самостоятельно делая опыты, вы учились элементам исследовательской работы физика-экспериментатора.

Теперь эта работа подошла к концу. Вы поставили бóльшую часть опытов, описанных в книге. Кое-что, возможно, у вас и не получилось. Может быть, вам удалось наблюдать новые эффекты, которые в книге не рассматривались. Что же дальше?

А дальше — нужно продолжать работать! Вы экспериментировали с ультразвуком в диапазоне частот от 20 кГц до 15 МГц, получение которого обеспечивают магнитострикционные излучатели. Однако магнитострикционные излучатели высокой частоты недостаточно совершенны, и одной из важнейших задач учебного эксперимента является дальнейшее их улучшение. Можно также порекомендовать вам просмотреть литературу по методике физики, в которой время от времени появляются описания интересных приборов, установок и экспериментов с ультразвуком.

Экспериментатору мало в совершенстве владеть методикой и техникой физического эксперимента. Очень важно ясное понимание сути физических явлений, их теоретической трактовки. Физика, как наука, представляет собой сплав эксперимента и теории. Нельзя надеяться стать хорошим экспериментатором, если пренебрегать изучением физической теории. Даже в этой книге, целиком посвященной простым

опытам с ультразвуком, мы не могли — да и не ставили себе такой цели — обойтись без теории. Поэтому, помимо изучения работ по учебному эксперименту, вам следует столь же тщательно изучать теоретические вопросы ультраакустики. Возможностей для этого гораздо больше: существуют прекрасные книги, из которых вы сможете почерпнуть для себя немало интересного.

Ну, а если вы увлеклись чем-либо иным? В добрый час! В физике нет таких вопросов, изучению которых не стоило бы посвятить свою жизнь. То, что вы получили, экспериментируя с ультразвуком, никогда не станет мертвым грузом. В какой бы области экспериментальной физики вы в дальнейшем ни работали, суть одна: вы исследуете природу. А раз так, то как бы различны ни казались специфические приемы работы, все равно вы вначале будете ставить проблему, затем разрабатывать или изучать теорию, создавать экспериментальную установку, выполнять эксперимент и, наконец, анализировать его результаты. Всему этому пыталась научить вас наша книга. Насколько это удалось — судить вам.

1. *Баулин И.* За барьером слышимости. М., «Знание», 1971.
2. *Борисов Ю. Я., Макаров Л. О.* Ультразвук в технике настоящего и будущего. М., Изд. АН СССР, 1960.
3. *Брегг У.* Мир света, мир звука. М., «Наука», 1967.
4. *Вечко Ю. И.* Мир ультразвука. Л., «Знание», 1963.
5. *Гриффин Д.* Эхо в жизни людей и животных. М., Физматгиз, 1961.
6. *Вуд А.* Звуковые волны и их применения. М.—Л., ОНТИ, Гостехиздат, 1934.
7. *Клюкин И. И.* Нептун оглушен. Л., «Судостроение», 1967.
8. *Клюкин И. И.* Звук и море. Л., «Судостроение», 1974.
9. *Кок У.* Звуковые и световые волны. М., «Мир», 1966.
10. *Кок У.* Видимый звук. М., «Мир», 1974.
11. *Красильников В. А.* Звуковые и ультразвуковые волны. М., Физматгиз, 1960.
12. *Кудрявцев Б. Б.* Простые опыты с ультразвуками. М., Учпедгиз, 1954.
13. *Кудрявцев Б. Б.* Неслышимые звуки. М., «Молодая гвардия», 1957.
14. *Михайлов И. Г.* Ультразвук и его применение. Л., «Знание», 1968.
15. *Мясников Л. Л.* Неслышимый звук. Л., «Судостроение», 1967.
16. *Ноздрев В. Ф.* Молекулярная акустика. М., «Знание», 1965.
17. *Ноздрев В. Ф., Маркосова Н. М.* Использование ультразвука в преподавании физики в средней школе. М., «Просвещение», 1965.
18. *Розенберг Л. Д.* Ультразвуки и их применение. М., «Знание», 1954.
19. *Розенберг Л. Д.* Рассказ о неслышимом звуке. М., Изд. АН СССР, 1961.
20. *Сергеев А.* Радиозлектроника под водой. Л., «Энергия», 1971.
21. *Фридман В. М.* Ультразвук. М., «Знание», 1960.
22. *Чедд Г.* Звук. М., «Мир», 1975.