

света легко наблюдать интерференционные полосы, вызванные суперпозицией отражений от обычного предметного стекла микроскопа или даже плоского оконного стекла.

Полное описание интерференционной картины в этом случае требует вычисления коэффициента отражения для нормально и косо падающих волн. Такие вычисления не представляют трудности, однако мы не будем ими заниматься. Мы рассмотрим только центральную полосу, соответствующую нормальному падению, и постараемся ответить на вопрос: насколько монохроматичным должен быть источник света? Ответ может быть получен из выражения (53).

Предположим, что  $L=1 \text{ мм}=0,1 \text{ см}$ . Если в свете присутствует только одно волновое число  $k_2$ , то центральная полоса будет максимумом или минимумом в зависимости от того, равно ли значение  $\sin^2 k_2 L$  единице или нулю. Если падающий свет представлен некоторым интервалом  $\Delta k$ , то в случае большого интервала для некоторых  $k$  будут получаться максимумы, а для некоторых минимумы и цвет полосы будет размыт. Насколько узким должен быть этот интервал волновых чисел  $\Delta k_2$ , чтобы можно было получить отчетливо видную центральную полосу? (Можно допустить, что в случае косо падения побочные полосы будут различимы, если различима центральная полоса.) Максимумы в последовательности, определяемой выражением (54), отстоят друг от друга на интервал  $\pi$  по аргументу  $k_2 L$ . В первом приближении можно считать, что мы получим четкие полосы, если  $(\Delta k_2) < \pi$ . Исходя из этого, можно показать (задача 5.25), что необходимый диапазон обратных значений длины волны равен

$$\Delta(\lambda^{-1}) \approx 3,3 \text{ см}^{-1}, \quad (55)$$

т. е.

$$\Delta\nu = c\Delta(\lambda^{-1}) \approx 10^{11} \text{ гц}.$$

Например, для зеленой линии ( $\lambda \approx 5,5 \cdot 10^{-5} \text{ см}$ )

$$\Delta\lambda \approx 1,0 \text{ \AA}.$$

Таким образом, необходимый диапазон должен быть меньше, чем  $3,3 \text{ см}^{-1}$ . Мы покажем в главе 6, что диапазон  $\Delta\nu \approx 10^9 \text{ гц}$  близок к естественной ширине линии для атома. Меньший диапазон частот можно получить только с помощью лазера. Таким образом, чтобы наблюдать четкие интерференционные полосы в оконном стекле, мы должны использовать источник из свободно излучающих атомов. Для этой цели может служить неоновая лампа (см. домашний опыт 5.10), а также пламя, в которое брошена щепотка соли или соды (см. домашний опыт 9.27).

## Задачи и домашние опыты

5.1. Опыт. *Отражение от стекла.* Плоская стеклянная пластина отражает около 8% интенсивности света при нормальном падении, по 4% от каждой поверхности. Обычное зеркало, покрытое амальгамой ртути, отражает более 90% видимого света. Возьмите зеркало и чистый кусок стекла (например, предметное стекло микроскопа). Сравните отражение от зеркала и от стекла, расположив их рядом,

так чтобы видны были сразу оба отражения. Посмотрите на отражение широкого источника, например лампы накаливания, куска белой бумаги или части неба. Сравните отражающую способность стекла и зеркала при падении, близком к нормальному. Теперь проделайте то же самое для скользящего падения света. В последнем случае отражение от зеркала и отражение от предметного стекла микроскопа практически мало различимы. При угле падения, близком к  $90^\circ$ , отражается почти 100% света. При падении, близком к нормальному, стекло отражает намного слабее, чем зеркало.

Теперь возьмите четыре чистых предметных (или, еще лучше, покровных) стекла микроскопа. Сложив их вместе в виде лестницы (первое стекло — основание, второе — первая ступенька и третье и четвертое — вторая ступенька двойной высоты), вы можете наблюдать отражение, близкое к нормальному, одновременно от одного, двух и четырех стекол. Посмотрите на отражение широкого источника при падении, близком к нормальному. Пренебрегая внутренними отражениями, можно считать, что через каждое стекло пройдет 92% начальной интенсивности  $I_0$ . Поэтому четыре стекла пропустят  $(0,92)^4 I_0 = 0,72 I_0$  и отразят  $I_0 (1 - (0,92)^4) \approx 0,28 I_0$ .

Теперь сделайте *столбик* из дюжины чистых предметных (покровных) стекол. Все вместе они должны отразить  $I_0 (1 - (0,92)^{12}) = 0,64 I_0$ . Сравните это с отражением от зеркала. Предположив, что используемое нами правило вычисления прошедшей и отраженной интенсивностей справедливо (и что стекла чистые), определите, сколько стекол будет соответствовать зеркалу для отражения, близкого к нормальному. Зеркало отражает около 93% падающей интенсивности. Посмотрите через составленную пачку стекол на источник. (В соответствии с нашим правилом потребуется около 32 стекол. Очевидно, стекла должны быть без отпечатков пальцев.)

**5.2. Опыт. Интерференция в тонких пленках.** (См. п. 5.5.) Наполните таз теплой водой. Капните на поверхность воды каплю масла и наблюдайте, как масло растекается. (Возьмите легкое масло; прованское масло, например, слишком тяжелое, и оно не будет растекаться.) Наблюдайте отражение неба (или другого протяженного источника света) в капле по мере ее растекания. (На дно таза хорошо поместить черную ткань или бумагу, чтобы избежать нежелательного отражения от дна.) Заметьте, что цветные узоры не появляются, пока пленка масла не расплывлась по площади порядка  $10 \times 10 \text{ см}^2$ . Почему?

Наблюдайте за цветными узорами по мере расплывания пленки. Когда пленка станет достаточно тонкой, узоры исчезнут. Пленка будет казаться темной в местах, где толщина масла наименьшая. Здесь толщина пленки меньше четверти длины волны. *Используйте этот факт для грубой оценки длины волны видимого света*, приняв толщину темной области пленки за восьмую часть длины волны. Оцените площадь пленки и, зная первоначальный объем капли, найдите толщину пленки, а по толщине определите длину волны.

**5.3. Опыт. Переходные стоячие волны в «пружине»\*).** Закрепите один конец «пружинки» и возьмитесь за другой. Растяните «пружину» примерно на 10 м. Встряхните очень быстро 3 или 4 раза ваш конец «пружинки». По «пружине» будет распространяться волновой пакет. «Налюбовавшись» пакетом, распространяющимся в прямом и обратном направлениях по «пружине», обратите внимание на область вблизи закрепленного конца. Когда волновой пакет входит в эту область, отражается и движется в обратную сторону, вы можете наблюдать *переходную стоячую волну*. Эта волна существует, пока падающий и отраженный пакеты перекрываются. Опыт показывает, что стоячую волну можно считать суперпозицией двух бегущих волн, распространяющихся в противоположных направлениях.

**5.4. Опыт. Многократное внутреннее отражение в предметном стекле микроскопа.** Нарисуйте ход луча, падающего (слева) под некоторым углом на стеклянную пластинку. Покажите первый прошедший через пластинку луч, второй (т. е. прошедший через пластинку после двух внутренних отражений), третий и т. д. Теперь посмотрите через предметное стекло микроскопа на точечный или линейный источник. Расположите стекло близко к глазу. Начните с нормально падающего света и постепенно наклоняйте стекло. Наблюдайте «виртуальные источники», появляющиеся вследствие многократных отражений. (Этот эффект будет сильным

\*) См. сноску на стр. 24.

при скользящем падении лучей.) Обратите внимание на свет, который выходит не из поверхности стекла, а у торцов пластинки. Это — «захваченный» свет, который в конце концов выходит из стеклянной пластинки, когда достигает ее торцов. При скользящем падении света на поверхность стекла угол падения света на торцевые поверхности пластинки близок к нормальному.

**5.5. Отражения в передающих линиях.** Предположим, что коаксиальная передающая линия 1 (характеристический импеданс 50 ом) подсоединена к линии 2 (характеристический импеданс 100 ом).

а) Импульс напряжения  $+10$  в (максимальное значение) приходит из первой линии во вторую. Какова величина (в вольтах) и знак отраженного импульса? Какова «высота» прошедшего импульса?

б) Импульс  $+10$  в поступает из 100-омной линии в 50-омную. Найдите величины отраженного и прошедшего импульсов.

**5.6. Необратимое согласование сопротивлений.** Рассмотрим передающие линии из задачи 5.5.

а) Как с помощью обыкновенного сопротивления, подключенного к этим линиям, добиться того, чтобы импульс, распространяющийся из линии 1 в линию 2, проходил 100-омную линию без отражения? Чему равна величина этого сопротивления? Нарисуйте примерный чертеж, показывающий центральную нить и внешний экран (второй провод) каждой линии в месте их соединения, а также подключенное сопротивление.

б) Какова величина прошедшего импульса? (Величина падающего импульса  $+10$  в.)

в) Теперь предположим, что импульс  $+10$  в послан в обратном направлении, т. е. из 100-омной линии в 50-омную. Что произойдет? Определите величину отраженного и прошедшего импульсов.

г) Рассмотрим задачу передачи импульса из 100-омной линии в 50-омную без образования отражения. Какой должна быть величина сопротивления и как его следует подключить к месту соединения линии? Какова величина прошедшего импульса, если величина падающего равна  $+10$  в? Что произойдет, если такой импульс будет распространяться из 50-омной линии в 100-омную?

**5.7.** Свет с длиной волны  $\lambda=5000$  Å падает нормально на прозрачный пластиновый диск, за которым стоит второй такой же диск. Расстояние между дисками велико по сравнению с длиной волны. Какая часть света пройдет через диски, если показатель преломления дисков  $n=1,5$ ? Пренебрегаем поглощением, внутренним многократным отражением и интерференционными эффектами.

О т в е т.  $I_{\text{прош}}/I_0 \approx 0,85$ .

**5.8.** Сравните амплитуды, интенсивности и коэффициенты отражения для света, падающего нормально на гладкую поверхность раздела, для падения: 1) из воздуха в воду и 2) из воды в воздух. (Для воды  $n=1,33$ .)

**5.9. Отражения в тонкой пленке воздуха.** Возьмите две оптически плоские стеклянные пластины. Пусть с одной стороны края пластин касаются друг друга, а с противоположной стороны между пластинами вставлена полоска бумаги, толщина которой равна толщине страницы этой книги. Таким образом, между пластинами находится воздушный клин. Мы хотим, чтобы последовательные узоры (кайма) зеленого света были отделены друг от друга расстоянием порядка 1 мм, чтобы их легко было наблюдать. Чему должна быть равна длина  $L$  воздушного клина?

**5.10. Опыт. Полосы Фабри — Перо в оконном стекле.** Для этого опыта необходим широкий, почти монохроматичный источник света. Наиболее дешевым и простым в обращении источником такого типа является стандартная неоновая лампа 120 или 220 в, ввинчивающаяся в обычный патрон. Лампы такого типа используют электромонтеры для проверки напряжения в сети. При работе лампы возникает круглый диск светящегося неона диаметром около 2,5 см. Включите лампу и посмотрите на нее через дифракционную решетку, расположенную близко к глазу. В спектре первого порядка, который виден под углом  $15$ — $20^\circ$  относительно центрального оранжевого изображения источника, вы сможете увидеть по крайней мере три ярких изображения источника: зеленое, оранжевое и красное. (В действительности каждое из этих изображений состоит из большого числа ярких линий.) Наблюдаемые «виртуальные источники» четки и не размазаны, что указывает на монохроматичность каждого отдельного изображения (в пределах, конечно,

разрешающей способности глаза). Каждый «источник» соответствует различным переходам возбужденного атома неона. Опыт состоит в следующем. Возьмите обыкновенный кусок стекла, например предметное стекло микроскопа или кусок оконного стекла\*). В крайнем случае можно использовать окно в вашей комнате. Расположив неоновую лампу около лица, наблюдайте отражение лампы в куске стекла. Если вы видите два отражения, то возьмите другой кусок стекла. (Оконное стекло после многих лет медленного вязкого течения становится клиннообразным.) Найдите чередующиеся темные и яркие полосы (т. е. горизонтальные линии) в отраженном свете. После минутного поиска их можно легко обнаружить, после чего наблюдение за ними не составит труда. (Стекло должно находиться на расстоянии примерно 60 см.) Появление полос объясняется интерференцией между отражениями от задней и передней поверхностей стекла. Чтобы доказать это, приклейте на поверхность стекла кусок прозрачной ленты и расположите стекло так, чтобы сначала эта поверхность была обращена к вам, а потом от вас. Наблюдайте за полосами на изображении источника в отраженном свете, когда лента находится в области отражения. Липкая поверхность соприкосновения ленты со стеклом является оптически грубой поверхностью, так как она имеет нерегулярности (например, прослойки воздуха) меньшие, чем длина волны света. В некоторых местах свет переходит из стекла в ленту без отражения (показатель преломления ленты близок к показателю преломления стекла) и отражается, только когда достигает внешней, обращенной к глазу, гладкой поверхности ленты. В других местах лента не касается поверхности стекла и отражение возникает от поверхности воздуха — стекло (т. е. воздух находится между поверхностью стекла и наклеенной лентой). Теперь, наблюдая интерференционные полосы, можно выяснить, является ли пластина стекла или целлофана оптически плоской. Прозрачная лента не является оптически плоской, а поверхность стекла оптически плоская. Испытайте поверхности поляридов, пластинок в четверть и половину длины волны, а также оптических фильтров из вашего оптического набора. Являются ли они оптически плоскими? Для этих опытов годится также обычная флюоресцентная лампа, но неоновая лампа лучше.

Вот опыт, который можно сделать с неоновой лампой (если не удастся выполнить его с флюоресцентной лампой). Наблюдайте за интерференционными полосами, возникающими при отражении света неоновой лампы от поляроида. Затем поместите перед глазами другой поляриод (или воспользуйтесь очками от солнца с поляроидами).

Наблюдайте за полосами при обеих ориентациях поляроида-мишени. *Теперь переверните поляриод-мишень и повторите опыт.* Таким образом, имеются четыре ориентации: оси поляридов параллельны, оси перпендикулярны и, кроме того, поляриод-мишень может быть перевернут. Обратите внимание на размеры полос. (Более широкой полосе соответствует более тонкая пленка.) Поляриод представляет собой «бутерброд» из трех слоев, с двумя внешними чистыми (прозрачными) слоями («хлеб») и центральным поглощающим слоем («ветчина»). *Являются ли, обе поверхности среднего слоя («ветчина») оптически гладкими?*

Приведем еще один интересный опыт (или демонстрацию) с полосами Фабри — Перо. Вечером, при отсутствии освещения, осветите лицо неоновой лампой. Посмотрите на ваше изображение в стекле, находящемся в шаге или двух от вас. Ваше лицо представляет теперь широкий источник монохроматического света. Наблюдайте концентрические круговые полосы. (Полосы будут круговые, если стекло достаточно плоское.) Эффект от опыта довольно жуткий.

**5.11. Опыт. Неоновый стробоскоп.** Опишем еще один интересный опыт с неоновой лампой. Расположите лампу на расстоянии примерно 30 см от глаза. Теперь смотрите не на лампу, а в направлении, составляющем угол около  $45^\circ$  с линией, соединяющей ваш глаз и лампу. Обратите внимание на мерцания лампы. Теперь посмотрите прямо на лампу. Мерцания исчезнут. Очевидно, природа так создала наш глаз, что при боковом зрении он чувствителен к очень быстрым изменениям интенсивности света. Это кажется разумным! (Такой опыт можно выполнить и с экраном телевизора. Сравните, что получается, если смотреть на экран прямо и

---

\*) Этот опыт выходит тем легче, чем тоньше стекло. Лучше всего его делать с покровным стеклом микроскопа. (Прим. ред.)

под углом.) Каждый электрод в неоновой лампе вспыхивает и гаснет с частотой 50  $\mu$ . Но моменты всплеск обоих электродов сдвинуты по фазе на  $180^\circ$ : когда один вспыхивает, другой гаснет. Поэтому неоновую лампу можно использовать как 50-либо как 100-герцевый стробоскоп, в зависимости от того, как она используется для освещения объекта. Легко показать, что электроды неоновой лампы находятся в противофазе. Вверните неоновую лампу в какой-нибудь не слишком тяжелый светильник, чтобы его можно было трясти. Поверните лампу так, чтобы были видны края обоих электродов. Теперь потрясите лампу из стороны в сторону с частотой 4  $\mu$  (если можете, то с большей частотой) и с максимально возможной амплитудой (порядка 10—20 см). Смотрите на оранжевые полосы, образованные электродами. Появятся ли они вместе или попеременно? Чтобы измерить частоту, вам нужны еще часы. Предположим, что движение синусоидально. Измерьте частоту и амплитуду, необходимые для того, чтобы две красные полосы выглядели как «прямоугольная волна». Поскольку известно, что частота света должна быть связана с 50  $\mu$  некоторым целым множителем, то из этого грубого опыта легко определить строб-частоту.

**З а м е ч а н и е.** Удобнее трясти не лампу, а смотреть на отражение лампы в зеркале и трясти зеркало. При помощи зеркала и неоновой лампы вы сможете получить прекрасную «прямоугольную волну». Таким же методом можно исследовать свечение экрана телевизора. Сделайте накладываемую на экран маску, через которую была бы видна вертикальная полоса экрана. Потрясите зеркало относительно вертикальной оси. Пилообразный импульс, который вы увидите, указывает на то, что некоторая часть телевизионной трубки испускает свет в любой момент времени (т. е. на зеркало все время падает свет от какой-либо части вертикальной полосы; полоса не мерцает). Поэтому, чтобы получить хороший стробоскоп на основе телевизионной трубки, вы должны использовать горизонтальную, а не вертикальную щель.

**5.12. Непрерывность волны на границе.** Мы нашли, что для света (или любого электромагнитного излучения), падающего из среды 1 в среду 2, при условиях, что магнитная проницаемость равна единице (или не изменяется на границе) и «геометрия» среды постоянна (передающая линия из параллельных пластин с неизменной формой поперечного сечения или пластина вещества в свободном пространстве), коэффициенты отражения и прохождения для электрического поля  $E_x$  и магнитного поля  $B_y$  равны

$$R_E = \frac{k_1 - k_2}{k_1 + k_2}, \quad T_E = 1 + R_E = \frac{2k_1}{k_1 + k_2},$$

$$R_B = \frac{k_2 - k_1}{k_2 + k_1}, \quad T_B = 1 + R_B = \frac{2k_2}{k_2 + k_1}.$$

Здесь  $k = n\omega/c$  и  $n$  — показатель преломления. Покажите, что коэффициенты отражения и прохождения для  $E_x$  указывают на то, что как  $E_x$ , так и  $\partial E_x/\partial z$  непрерывны на границе, т. е. имеют одно и то же мгновенное значение с обеих сторон от границы [под полем слева от границы (среда 1) мы, конечно, подразумеваем *суперпозицию* падающей и отраженных волн]. Покажите также, что коэффициенты отражения и прохождения для магнитного поля  $B_y$  указывают на непрерывность на границе поля  $B_y$  и разрыв непрерывности в  $\partial B_y/\partial z$ . Покажите, что при переходе из среды 1 в среду 2 величина производной  $\partial B_y/\partial z$  возрастает в  $(k_2/k_1)^2 = (n_2/n_1)^2$  раз.

**5.13.** Покажите, что для волн в струне граничное условие, аналогичное постоянству магнитной проницаемости (на границе) для света, заключается в постоянстве плотности массы струны. Покажите, что уменьшение диэлектрической постоянной для света при переходе через границу двух сред аналогично уменьшению натяжения струны. Покажите, что скорость поперечных волн в струне ведет себя так же, как магнитное поле в световой волне, в том смысле, что она (скорость) непрерывна, но ее производная по  $z$  уменьшается в  $(k_2/k_1)^2$  раз при переходе из среды 1 в среду 2. Покажите, что поведение поперечного натяжения  $-T_0 \partial\phi/\partial z$  аналогично поведению электрического поля в том смысле, что как натяжение, так и производная натяжения по  $z$  непрерывны на границе. (Во всех случаях мы

имеем в виду общее поле, а не его компоненты, распространяющиеся в некоторых направлениях.)

**5.14.** Рассмотрим коаксиальный кабель, между проводниками которого вакуум. Характеристический импеданс кабеля равен  $50 \text{ ом}$ . Теперь предположим, что один конец этого кабеля замкнут на «эквивалент», для которого величина  $\rho/d$  равна  $377 \text{ ом}$ , т. е. внутренний и внешний проводники кабеля подсоединены к «эквиваленту». Пользуясь обычным омметром, на другом конце кабеля измеряют сопротивление постоянному току между внешним и внутренним проводниками кабеля. Сопротивлением самих проводников можно пренебречь (кусочек кабеля нужно сделать максимально коротким). При этом измеряемое омметром сопротивление будет полностью определяться подключенным «эквивалентом». Что покажет омметр? Объясните ваше предположение.

**5.15.** Опыт. *Эффективная длина трубки с открытым концом для стоячих волн.* Для опыта используйте картонную трубку (на которую наматывается бумажное полотенце). В качестве стандарта частоты используйте камертон С523,3. Слегка ударьте открытым концом трубки о голову и слушайте. Отрежьте небольшую часть трубки (если это необходимо), чтобы слышимый звук был более высокой частоты, чем 523,3 гц. Теперь вставьте в открытый конец трубку несколько меньшего диаметра, которой можно манипулировать, как при игре на тромбоне. (Для этой цели можно использовать картонную трубку. Разрежьте ее вначале по длине и снимите часть картона, из которого сделана трубка, чтобы получить трубку меньшего диаметра. Затем сверните и заклейте трубку по шву лентой, чтобы из боковой поверхности не выходил воздух.) Мода, которую вы услышите, является самой низкой модой трубки с открытым концом. В трубке «помещается» половина длины волны колебаний, соответствующих этой моде. Скорость звука  $332 \text{ м/сек}$ . Поэтому можно ожидать, что длина трубки равна

$$L = \frac{1}{2} \frac{v}{\nu} = \frac{1}{2} \frac{3,32 \cdot 10^4}{523,3} = 31,7 \text{ см.}$$

Однако в действительности длина трубки  $L_0$  меньше  $31,7 \text{ см}$  на величину  $0,6$  диаметра трубки. Это можно объяснить «концевым эффектом», приводящим к увеличению обоих концов трубки на величину  $0,6 R$ , где  $R$  — радиус трубки. Чтобы убедиться в том, что это именно «концевой эффект», сделайте опыт с толстыми и с тонкими трубками.

**5.16.** Опыт. *Резонанс в картонных трубках.* Воспользуйтесь трубками из опыта 5.15. Вибрирующий камертон расположите у одного конца трубки. Систему из двух трубок, вставленных одна в другую (опыт 5.15), будем называть «тромбоном». Если взаимное расположение трубок таково, что тромбон настроен на 523,3 гц, то вы услышите прекрасный громкий звук. Если этого не происходит, настройте «тромбон» в резонанс. Вопросы: когда тон (частота) собственных колебаний воздуха в трубке отличен от тона (частоты) возмущающего трубку камертона, то какой тон (частоту) вы слышите? (Сперва, пользуясь знанием теории вынужденных колебаний, предположите, каким должен быть ответ. Затем сделайте опыт.)

Вот способ, с помощью которого можно получить прекрасный острый резонанс. Расположите трубку вертикально, погрузив нижний конец в достаточно глубокой сосуд с водой. Вибрирующий камертон держите у открытого конца. Настройте трубку в резонанс, поднимая или опуская ее.

Рассмотрим еще один хороший способ настройки на резонанс. Наполните бутылку водой примерно на две трети, так чтобы, продувая воздух вблизи горлышка бутылки, вы слышали звук чуть-чуть выше, чем С523,3. Положите в бутылку соломинку, а вибрирующий камертон расположите около горлышка. Высасывая воду с помощью соломинки, настройте бутылку в резонанс.

Попробуйте петь, медленно меняя высоту тона. Вы сможете наблюдать резонанс в картонных трубках, кувшинах, комнатах и туннелях. Вы услышите и «почувствуете» сильные резонансы. Изменение импеданса может фактически «выключить» вас или заставить сместиться за соседнему тону.

**5.17.** Опыт. *Является ли звукопроводящая система человека (барабанная перепонка, нервы, мозг) фазочувствительным детектором?* Давайте выясним это! Иногда можно слышать утверждение, что человек обнаруживает направление распространения звука, замечая временную задержку между приходом гребня

волны в одно и другое ухо. Это означало бы, что человек реагирует на сдвиг фаз между колебаниями обеих барабанных перепонки. Иными словами, дело сводится к вопросу: можете ли вы ощутить разницу между следующими двумя состояниями барабанных перепонки: 1) обе перепонки вогнуты, обе перепонки выгнуты, обе перепонки вогнуты, обе перепонки выгнуты, и т. д. и 2) левая перепонка вогнута, правая выгнута, левая перепонка выгнута, правая вогнута и т. д.?

Вначале возьмем картонную трубку с открытыми концами (для получения приятного громкого звука используем камертон С523). Пусть длина трубки равна  $\lambda/2$ . Это значит, что в момент, когда на правом конце трубки воздух устремляется вправо, на левом конце он устремляется влево, т. е. при резонансе скорости воздуха на обоих концах сдвинуты на  $180^\circ$ : в данный момент времени на обоих концах воздух устремляется либо из трубки, либо в трубку. Теперь ударьте два камертона С523 друг о друга одинаковым образом и около каждого конца трубки поставьте по звучащему камертону, чтобы получить биения. При максимальной интенсивности звучания каждый камертон помогает воздуху идти туда, куда ему необходимо идти, чтобы резонировать, т. е. в тот момент, когда камертон на одном конце толкает воздух в трубку, камертон на другом конце делает то же самое, и т. д. В следующую половину цикла биений мы имеем минимум интенсивности звука, исходящего из трубки. (Этот минимум равен нулю, если амплитуда колебаний обоих камертонов одинакова.) Минимум образуется потому, что, когда один камертон толкает воздух внутрь трубки, камертон на другом конце вытягивает воздух из трубки. В этом случае действительные камертоны противоположно действиям, необходимым для поддержания резонанса.

Смысл этого опыта в том, что трубка может «сказать», колеблются ли камертоны в фазе или в противофазе.

В случае переноса этого опыта на ваш слуховой аппарат вопрос ставится следующим образом: если поднести к каждому уху по камертону, то услышите ли вы биения? Сможет ли ваша звуковая система «сказать», что звук приходит из левой части комнаты; что звук приходит из правой части комнаты и т. д.? Такое чередование направлений должно соответствовать максимумам и минимумам биений. Если правильно утверждение, что направления распространения звука определяются по разности фаз, и если, например, колебания одной барабанной перепонки опережают другую на  $90^\circ$ , то мозг должен «сигнализировать», что звук приходит со стороны опережающей барабанной перепонки. В нашем опыте это направление должно меняться с частотой биений. Чтобы ответить на поставленный вопрос, проделайте описанный опыт.

#### 5.18. Опыт. Измерение разности фаз между двумя концами открытой трубки.

Положим, что у вас есть длинная трубка в виде шланга. Сверните ее и положите в коробку. Пусть один открытый конец трубки выходит из одного края коробки, а другой из другого. Вы не знаете, какая часть трубки (свернутой, как катушка) осталась в коробке (коробка закрыта). Добавив для настройки небольшой «тронбон» к высовывающемуся концу, вы обнаружите, что с помощью камертона С523,3 можно получить резонанс (т. е. можно заставить трубку резонировать). Это значит, что полная длина трубки равна или  $\frac{1}{2}\lambda$ , или  $\lambda$ , или  $\frac{3}{2}\lambda$ , или... Как определить, равна ли длина трубки четному или нечетному числу  $\lambda/2$ ? Расположите два вибрирующих камертона у одного конца трубки и слушайте биения. Поймите ритм биений и качайте головой в такт ритму. Добейтесь того, что если вы уберете один камертон и затем вернете его на место (не нарушая непрерывных колебаний камертонов), то максимум биений не сместится во времени, т. е. ритм не нарушится. Поупражняйтесь несколько раз, чтобы в конце концов можно было, убрав один камертон, считать биения только по пойманному ритму. Затем, вновь поднеся камертон, убедитесь, что не сбился с ритма биений. (Для слежения за ритмом можно использовать метроном.) Теперь вместо того, чтобы поставить на место убранный (на мгновение) камертон, поставьте его около другого конца трубки и снова слушайте биения. (Все это время камертоны продолжают колебаться.) Будет ли ритм этих биений совпадать с ритмом старых биений? В зависимости от результата, полученного в этом опыте, можно решить, равна ли длина трубки четному или нечетному числу полуволен. Предскажите ответ; затем сделайте опыт с трубкой в полдлины волны. (Чтобы получить противоположный результат, сделайте опыт с трубкой, длина которой в два раза больше.)

**5.19. Опыт. Обертоны камертона.** Испускает ли камертон С523,3 звук только одной частоты 523,3 гц? Ударьте камертон сильнее. Кроме сильного тона в 523 гц вы услышите слабый высокий тон. Он исчезает за две-три секунды. Это — более высокая мода камертонных колебаний, которая сильнее затухает, так как определяется большим изгибом зубьев камертона.

Чтобы лучше услышать ноту С1046 (т. е. на октаву выше основного колебания), нужно иметь трубку, настроенную на 1046 гц. (Длина такой трубки по «теории» равна  $\lambda/2$  плюс на каждом конце 0,6 длины радиуса трубки. Здесь  $\lambda$  — длина волны для частоты 1046 гц.) Поместите камертон С523 у конца такой трубки и слушайте. (Для контроля имейте трубку, настроенную на 523 гц. Перемещайте камертон туда и обратно между трубками С523 и С1046.)

**5.20. Синусоидальная волна в общем случае.** Запишите бегущую волну  $\psi(z, t) = A \cos(\omega t - kz)$  в виде суперпозиции двух стоячих волн, а стоячую волну  $\psi(z, t) = A \cos \omega t \cos kz$  как суперпозицию двух волн, бегущих в противоположных направлениях. Рассмотрите следующую суперпозицию бегущих волн:

$$\psi(z, t) = A \cos(\omega t - kz) + RA \cos(\omega t + kz).$$

Покажите, что эта синусоидальная волна эквивалентна суперпозиции стоячих волн вида

$$\psi(z, t) = A(1+R) \cos \omega t \cos kz + A(1-R) \sin \omega t \sin kz.$$

Таким образом, одну и ту же волну можно представить как суперпозицию либо стоячих волн, либо бегущих волн.

**5.21. Неотражающее покрытие.** Стеклообразная линза покрыта неотражающим слоем толщиной в четверть длины волны для света с длиной волны в вакууме  $\lambda_0$ . Показатель преломления покрытия равен  $\sqrt{n}$ ; показатель преломления стекла  $n$ . Предположим, что показатель преломления постоянен, т. е. не зависит от частоты. Обозначим через  $I_{\text{отр}}$  среднюю во времени интенсивность отраженного света, а через  $I_0$  — интенсивность падающего света (при нормальном падении). Покажите, что интенсивность  $I_{\text{отр}}$  следующим образом зависит от длины волны:

$$\frac{I_{\text{отр}}}{I_0} = 4 \left[ \frac{1 - \sqrt{n}}{1 + \sqrt{n}} \right]^2 \sin^2 \frac{1}{2} \pi \left( \frac{\lambda_0}{\lambda} - 1 \right),$$

где  $\lambda$  — длина волны падающего света в вакууме. Пусть для стекла  $n=1,5$  и  $\lambda_0=5500 \text{ \AA}$  (зеленый свет). В этом случае  $I_{\text{отр}}$  равно нулю. Чему равно отношение  $I_{\text{отр}}/I_0$  для синего света ( $\lambda_0=4500 \text{ \AA}$ )? Чему равно это отношение для красного света ( $\lambda_0=6500 \text{ \AA}$ )?

**О т в е т.** Для красного света интенсивность отраженного света составляет  $2 \cdot 10^{-3}$  интенсивности падающего; для голубого света она в два раза больше.

**5.22. Согласование импедансов с помощью плавного изменения показателя преломления.** Мы хотим согласовать оптические импедансы двух сред с показателями преломления  $n_1$  и  $n_2$ , используя для согласования переходный слой толщиной  $L$ . Что представляет собой оптимальная зависимость показателя преломления  $n$  от  $z$  в этом слое? Будет ли она экспоненциальной? Почему нет?

**О т в е т.** Длина волны  $\lambda = (c/v)/n$  должна меняться линейно с  $z$ , т. е., если переходная область простирается от  $z=0$  до  $z=L$ ,  $\lambda(z) = \lambda_1 + (z/L)(\lambda_2 - \lambda_1)$ .

**5.23. Самая красивая кайма.** Посмотрите на конструктивные интерференционные полосы от двух прижатых друг к другу предметных стекол микроскопа. Центр этой картины будет черным (т. е. от соответствующего места пластин не происходит отражения падающего излучения). Первая полоса белая. Далее полосы становятся цветными. Примерно после дюжины полос мы найдем, что все цвета смешались и перекрылись и мы опять получили белый свет. Какая полоса (группа) выглядит наиболее монохроматичной? Более точно: назовем «самой красивой» полосой ту, которая «не красная и не синяя» (длина волны красного света 0,65 мкм, а синего — 0,45 мкм). Выражение «не красная и не синяя» означает, что для этой полосы, как для красного, так и для синего цвета, происходит деструктивная интерференция.

**5.24. Интерференция в тонких пленках.** Покажите, что при отражении монохроматического света (нормальное падение) от слоя воздуха толщиной  $L$ , находя-



щегося между двумя предметными стеклами микроскопа, интенсивность отраженного света в приближении слабого отражения равна

$$\frac{I_{\text{отр}}}{I_0} \approx 4R_{12}^2 \sin^2 k_2 L.$$

(Интерференцией от двух внешних поверхностей обоих стекол можно пренебречь. Интерференционные полосы от этих поверхностей будут размыты для любого источника, за исключением, конечно, очень монохроматического источника. Об этом мы говорили в опыте 5.10 «Полосы Фабри — Перо в оконном стекле».)

5.25. *Полосы Фабри — Перо в 1-миллиметровой стеклянной пластине.* Покажите, что для того, чтобы с помощью стеклянной пластины толщиной в 1 мм получить интерференционные полосы Фабри — Перо, «ширина линии» (т. е. полоса частот) должна быть меньше, чем  $3 \text{ см}^{-1}$ . При этом условии полосы не будут размываться.

5.26. *Множественное отражение.* В приведенных ниже выкладках следует использовать комплексные числа. Пусть  $\psi_{\text{пад}}$  равно вещественной части выражения  $A \exp [i(\omega t - kz)]$ , где  $A$  — вещественное число. Таким образом,  $\psi_{\text{пад}} = A \cos(\omega t - kz)$ . При  $z=0$  импеданс изменяется скачком от  $Z_1$  до  $Z_2$ . При  $z=L$  импеданс опять меняется от  $Z_2$  до  $Z_3$ . Имеем  $R_{12} = (Z_1 - Z_2)/(Z_1 + Z_2) = -R_{21}$ ,  $R_{23} = (Z_2 - Z_3)/(Z_2 + Z_3)$ . Предположим, что в среде 1 имеется отраженная волна, определяемая вещественной частью  $RA \exp [i(\omega t + kz)]$ , где  $R$  — комплексная величина, которую можно представить в виде  $R = |R| \exp(-i\delta)$ .

а) Покажите, что если пренебречь всеми вкладками, кроме отражения от  $z=0$  и первого отражения от  $z=L$ , то

$$R = R_{12} + T_{12} R_{23} T_{21} e^{-2ik_2 L},$$

где  $T_{12} = 1 + R_{12}$  и  $T_{21} = 1 + R_{21} = 1 - R_{12}$ .

б) При помощи суммирования бесконечного ряда, определяемого бесконечным числом отражений, покажите, что точное решение для  $R$  имеет вид

$$R = R_{12} + \frac{(1 - R_{12}^2) R_{23} e^{-2ik_2 L}}{1 - R_{23} R_{21} e^{-2ik_2 L}},$$

где первый член  $R_{12}$  обусловлен разрывом непрерывности в  $z=0$ , а второй член определяется отражением (однократным или многократным) от границы  $z=L$ . Покажите, что в приближении слабого отражения из этой формулы получается результат а). Покажите, что точный результат может быть записан в виде

$$R = \frac{R_{12} + R_{23} e^{-2ik_2 L}}{1 + R_{12} R_{23} e^{-2ik_2 L}}.$$

Покажите, что это точное выражение для  $R$  стремится к выражению, полученному для  $R$  в приближении слабого отражения, использованном в п. 5.5. Таким образом, приближенное выражение правильно определяет нули интенсивности и не совсем точно — интенсивность в максимуме.

5.27. *Метод граничных условий для коэффициентов отражения и прохождения.* Рассмотрим совершенно другое решение задачи 5.26. Вместо суммирования бесконечного числа многократно отраженных лучей сделаем следующее допущение: каждый «луч» из суперпозиции многократно отраженных лучей непрерывен. Поэтому сама суперпозиция также непрерывна. Это предположение является основой метода. Таким образом, мы больше не станем заниматься суммированием многократных отражений. Вместо этого мы записываем функцию  $\psi(z, t)$  в трех областях: 1 ( $z < 0$ ), 2 ( $0 < z < L$ ) и 3 ( $z > L$ ) — и считаем, что эта функция определяется вещественной частью следующих выражений:

$$\psi_1(z, t) = e^{i(\omega t - k_1 z)} + R e^{i(\omega t + k_1 z)},$$

$$\psi_2(z, t) = F e^{i(\omega t - k_2 z)} + B e^{i(\omega t + k_2 z)},$$

$$\psi_3(z, t) = T e^{i[\omega t - k_3(z - L)]},$$

где  $R$ ,  $F$ ,  $B$  и  $T$  — комплексные коэффициенты, которые нужно определить. Коэффициент  $R$  характеризует отраженную волну,  $F$  — волну, распространяющуюся

вперед, и  $B$  — назад, а коэффициент  $T$  — прошедшую в третью среду волну. (Для простоты амплитуду падающей волны мы полагаем равной единице). Заметим, что член с комплексной амплитудой  $F$  соответствует суперпозиции всех многократно отраженных лучей между  $z=0$  и  $z=L$ , которые идут в момент времени  $t$  в прямом направлении. Аналогично, член с комплексной амплитудой  $B$  равен суперпозиции всех лучей, идущих в обратном направлении. На двух границах  $z=0$  и  $z=L$  следует использовать граничные условия непрерывности. Положим, что  $\psi(z, t)$  и  $\partial\psi(z, t)/\partial z$  непрерывны на границах. (Это значит, что натяжение струны постоянно, или, в случае звуковых волн, произведение равновесного давления  $p_0$  на  $\gamma$  постоянно, или постоянна магнитная проницаемость  $\mu$  в случае электромагнитных волн.) Два эти граничных условия для двух границ дадут четыре линейных уравнения относительно четырех комплексных величин  $T, F, B$  и  $R$ . Этих уравнений достаточно, чтобы однозначно определить  $T, F, B$  и  $R$ . Подтвердите это. Найдите  $T, F, B$  и  $R$ .

Покажите, что выражение для  $R$ , полученное этим способом, аналогично выражению, полученному способом многократного отражения в задаче 5.26.

### 5.28. Резонанс для проходящих волн.

а) Покажите, что при отражении на двух границах (задачи 5.26 и 5.27) часть среднего во времени потока энергии, которая не отразилась, равна

$$1 - |R|^2 = \frac{1 - R_{12}^2 - R_{23}^2 + R_{12}^2 R_{23}^2}{1 + 2R_{12}R_{23} \cos 2k_2L + R_{12}^2 R_{23}^2}.$$

б) Покажите, что если импеданс среды 3 равен импедансу среды 1, это выражение принимает вид

$$1 - |R|^2 = \frac{(1 - R_{12}^2)^2}{1 - 2R_{12}^2 \cos 2k_2L + R_{12}^4}.$$

в) Покажите, что при некоторых значениях  $k_2L$  средний во времени поток неотраженной энергии равен единице, т. е. для этих значений вся энергия проходит без отражения. Обозначим одно из этих резонансных значений  $k_2$  через  $k_0$ . Покажите, что резонансные значения  $k_2L$  равны  $k_0L = \pi, 2\pi, 3\pi$  и т. д.

г) Покажите, что для  $k_2$ , достаточно близкого к резонансному значению  $k_0$ , средний во времени поток энергии равен

$$1 - |R|^2 \approx \frac{(1 - R_{12}^2)^2}{(1 - R_{12}^2)^2 + R_{12}^2 [2L(k_2 - k_0)]^2}.$$

Покажите, что это выражение соответствует резонансной кривой Брейта — Вигнера, рассмотренной в п.3.2, и имеет полную ширину по  $\Delta k_2$  на половинном уровне пропущенной интенсивности, равную

$$(\Delta k_2)L \approx \frac{(1 - R_{12}^2)}{|R_{12}|},$$

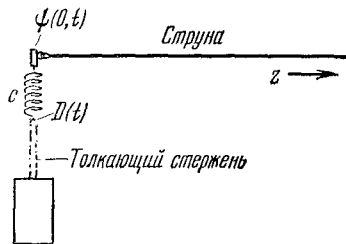


Рис. к задаче 5.29.

при условии, что  $|R_{12}|$  намного меньше единицы. (Покажите, что для  $|R_{12}| \ll 1$  приближение Брейта — Вигнера бесполезно, так как оно не выполняется, за исключением значений  $k$ , очень близких к  $k_0$ , т. е. оно не выполняется даже для точек, определяемых по половине максимальной пропущенной мощности.) Покажите, что для  $|R_{12}| \approx 1$ , когда резонансная кривая Брейта — Вигнера справедлива

для многих  $k$ , отличных от  $k_0$ , полная резонансная ширина равна

$$(\Delta k_2)L \approx 2(1 - |R_{12}|).$$

5.29. Полубесконечная струна присоединена к выходным зажимам передатчика через пружину, как показано на рисунке. Натяжение пружины равно  $T$ , плотность струны  $\rho$  и коэффициент жесткости пружины  $K$ . Длина пружины такова, что если смещение возмущающего стержня  $D(t)$  равно нулю и пружина расслаб-

лена, то  $\psi(0, t)$  равно нулю. Движение стержня определяется выражением  $D(t) = A \cos \omega t$ . Предположим, что по струне бежит гармоническая волна  $\psi(z, t) = B \cos(\omega t - kz + \varphi)$ . Укажите граничные условия в точке  $z=0$  и используйте их для нахождения  $B/A$  и  $\psi$ . (Совет. Выкладки упростятся при использовании комплексных чисел.)

О т в е т.  $\operatorname{tg} \varphi = -\omega(T\rho)^{1/2}/K$ ,  $B/A = [1 + (\omega^2 T\rho/K^2)]^{-1/2} = \cos \varphi$ . Заметим, что для очень большого  $K$  имеем  $\psi(0, t) = D(t)$ , как и следовало ожидать. Почему?

5.30. Предположим, что точка  $a$  струны, имеющая координату  $z_a = 10$  см, совершает гармоническое колебание с частотой 10 гц и амплитудой 1 см. Фаза колебаний такова, что в момент времени  $t=0$  точка проходит положение равновесия со скоростью, направленной вверх (положительное смещение отсчитывается вверх).

а) Чему равна величина и какое направление имеет скорость в точке  $a$  в момент  $t=0,05$  сек? Параметры струны (масса на единицу длины и натяжение) таковы, что скорость волны равна 100 см/сек.

б) Чему равна длина бегущей волны? Чему равна длина стоячей волны?

в) Другая точка  $b$  с координатой  $z_b = 15$  см колеблется с той же амплитудой, что и точка  $a$ , но сдвинута относительно нее по фазе на  $180^\circ$ . Можете ли вы сказать, какую из трех волн мы имеем: «чистую» бегущую волну, «чистую» стоячую волну или же их комбинацию?

г) Третья точка  $c$  ( $z_c = 12,5$  см) колеблется с той же амплитудой, что и точка с координатой  $z_a = 10$  см, но со сдвигом по фазе в  $180^\circ$ . Точка колеблется по-прежнему. Теперь скажите, является ли волна бегущей, стоячей или комбинацией этих волн.

5.31. Опыт. Резонанс в надувных шарах. Возьмите шар, наполненный гелием. Поднесите его к уху и легко ударьте. Спойте какую-либо ноту с одной стороны шара и слушайте резонансные тона. Надуйте другой шар воздухом до того же диаметра (что и шар с гелием) и ударьте его. Оцените отношение частот для самых низких мод (это те моды, которые вы слышите после удара) при наполнении шаров гелием и воздухом. Какое отношение частот вы могли бы предсказать? Сравните силу (громкость) резонанса, который имеет место, когда вы поете рядом с шаром с гелием и рядом с воздушным шаром. Как объяснить такое различие?

5.32. Нагрузка для волн в струне.

а) Допустим, у нас есть невесомый амортизатор с двумя движущимися элементами 1 и 2, способными смещаться относительно друг друга вдоль направления  $x$ , перпендикулярного направлению струны  $z$ . Трение создается жидкостью, которая тормозит движущиеся элементы. Это трение таково, что сила, необходимая для поддержания постоянной относительной скорости  $(\dot{x}_1 - \dot{x}_2)$  движущихся элементов, равна  $Z_d(\dot{x}_1 - \dot{x}_2)$ , где  $Z_d$  — импеданс поршня. Вход (элемент 1) подсоединен к концу струны с импедансом  $Z_1$ , простирающейся от  $z = -\infty$  до  $z = 0$ . Выход (элемент 2) подсоединен к струне с импедансом  $Z_2$ , простирающейся до  $z = +\infty$ . Покажите, что волна, падающая слева, «чувствует» импеданс в  $z=0$  такой же, как если бы она была подсоединена к струне, простирающейся от  $z=0$  до  $z = +\infty$ , с импедансом  $Z_L$ , равным

$$Z_L = \frac{Z_d Z_2}{Z_d + Z_2}, \text{ т. е. } \frac{1}{Z_L} = \frac{1}{Z_d} + \frac{1}{Z_2}.$$

Таким образом, этот импеданс соответствует параллельному соединению импедансов поршня и второй струны.

б) Покажите, что если струна  $Z_2$  простирается только до  $z = 1/4 \lambda_2$ , где  $\lambda_2$  — длина волны в среде 2 (предполагаем, что имеем дело с гармонической волной), и если в  $z = 1/4 \lambda_2$  она нагружена на поршень с нулевым импедансом, то падающая волна имеет в  $z=0$  согласованную нагрузку.

Покажите, что выходные зажимы поршня в  $z=0$  «не могут знать», подсоединены ли они к струне с бесконечным импедансом или же к струне длиной в четверть волны, которая «коротко замкнута» в  $z = 1/4 \lambda_2$  на поршень без трения. В том и другом случае выходные зажимы остаются в покое.

5.33. Акустические свойства помещений. Акустические свойства комнаты определяются главным образом «временем реверберации» и его зависимость от частоты. Предположим, что в комнате поддерживаются установившиеся вынужденные

колебания воздуха определенной частоты. Затем вынуждающая сила (в качестве которой может служить возбуждаемая органная трубка) неожиданно выключается. Запасенная звуковая энергия будет спадать примерно по экспоненте со средней постоянной времени  $\tau$ , определяемой по формуле

$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{E_{\text{зап}}} \frac{dE_{\text{потер}}}{dt}.$$

Нам известно, что одномерный гармонический осциллятор ведет себя аналогичным образом, т. е. «поведение» комнаты можно сравнить с поведением одномерного осциллятора. Обозначим через  $\rho_E$  плотность звуковой энергии, а через  $V$  объем комнаты. Чему равна запасенная энергия? Для плоской бегущей волны поток энергии [в  $\text{эрг}/(\text{см}^2 \cdot \text{сек})$ ] равен плотности энергии, умноженной на скорость звука  $v=332 \text{ м/сек}$ . Звуковые волны в комнате не являются бегущими волнами, но их можно рассматривать как суперпозицию бегущих волн, распространяющихся во всех направлениях. Можно считать, что одна шестая часть энергии распространяется в каждом из шести направлений, т. е. вдоль направлений  $\pm x$ ,  $\pm y$  и  $\pm z$ .

Поток энергии, распространяющийся в направлении  $+x$ , встречает на своем пути открытое окно и теряется. Поэтому говорят, что открытое окно имеет коэффициент поглощения  $a=1,0$ . Стены (потолок и пол) имеют полную площадь  $A$ , которую можно рассматривать как сумму площадей  $A_1$ ,  $A_2$  и т. д., каждой из которых соответствует коэффициент поглощения  $a_1$ ,  $a_2$  и т. д. Введем следующее приближенное выражение для постоянной времени:

$$\tau \sum (A_i a_i) \approx \frac{6V}{v},$$

где сумма берется по всей поверхности комнаты. Воспользуемся приведенной табл. 5.1 для коэффициентов поглощения.

Т а б л и ц а 5.1

Коэффициенты поглощения  $a_i$  для частоты  $\nu=512 \text{ гц}$

Открытое окно	1,00	Человек	0,44
Ковер	0,20	Дерево	0,061
Линолеум	0,12	Штукатурка	0,033
Войлок толщиной в 1 дюйм	0,78	Стекло	0,027

В 1895 г. Уоллеса Сабина попросили «что-нибудь» сделать с ужасными акустическими свойствами лекционного зала в Гарвардском музее искусств, который был только что построен. Вычислите, насколько плох был этот зал (т. е. какова была продолжительность звучания  $\tau$ ), пользуясь следующей информацией (W. C. Sabine, Collected Papers on Acoustics, p. 30, Dover, 1964):  $V=2740 \text{ м}^3$ ; форма зала примерно кубическая; стены и потолок оштукатурены, пол деревянный. Считайте также, что время звучания (т. е. время, в течение которого слышится звук после выключения источника) равно примерно четырем  $\tau$ . Сабин в качестве детектора использовал человеческое ухо. Полученное им экспериментальное значение времени звучания равно  $5,61 \text{ сек}$ . С помощью различных поглощающих материалов он уменьшил его до  $0,75 \text{ сек}$ .