

на слой полное пропускание имеет место, когда на толщине слоя укладывается целое число полуволн:  $d = \frac{1}{2}\lambda_2 n$ , где  $n = 1, 2, 3, \dots$ ,  $\lambda_2$  — длина звуковой волны в материале слоя; поэтому слой, для к-рых выполнено условие (8), наз. полуволновыми. Соотношение (8) совпадает с условием существования нормальной волны в свободном жидком слое. В силу этого полное пропускание через слой возникает, когда падающее излучение возбуждает в слое ту или иную нормальную волну. За счёт контакта слоя с окружающей жидкостью нормальная волна является вытекающей: при своём распространении она полностью переизлучает энергию падающего излучения в нижнюю среду.

Когда жидкости по разные стороны от слоя различны, наличие полуволнового слоя никак не сказывается на падающей волне: коэф. отражения от слоя равен коэф. отражения от границы этих жидкостей при их непосредств. контакте. Помимо полуволновых слоёв в акустике, как и в оптике, большое значение имеют т. н. четвертьволновые слои, толщины к-рых удовлетворяют условию  $k_2 d = \pi/2 + \pi n$  ( $n = 1, 2, \dots$ ). Подбирая соответствующим образом акустич. импеданс слоя, можно получить нулевое отражение от слоя волны с заданной частотой  $f$  при определённом угле падения её на слой. Такие слои используются в качестве просветляющих акустических слоёв.

Для отражения звуковой волны от бесконечной твёрдой пластины, погружённой в жидкость, характер отражения, описанный выше для жидкого слоя, в общих чертах сохраняется. При перетражениях в пластине дополнительно к продольным будут также возбуждаться сдвиговые волны. Углы  $\theta_{TL}$  и  $\theta_{LT}$ , под к-рыми распространяются соответственно продольные и поперечные волны в пластине, связаны с углом падения законом Снелля. Угл. и частотная зависимости  $|R|$  будут представлять собой, как и в случае отражения от жидкого слоя, системы чередующихся максимумов и минимумов. Полное пропускание через пластину возникает в том случае, когда падающее излучение возбуждает в ней одну из нормальных волн, представляющих собой вытекающие Лэмба волны. Резонансный характер О. з. от слоя или пластины стирается по мере того, как уменьшается отличие их акустич. свойств от свойств окружающей среды. Увеличение акустич. затухания в слое также приводит к сглаживанию зависимостей  $|R(\theta)|$  и  $|R(f)|$ .

**Отражение неплоских волн** [1—3, 7, 12]. Реально существуют только неплоские волны; их отражение может быть сведено к отражению набора плоских волн. Монохроматич. волну с волновым фронтом произвольной формы можно представить в виде совокупности плоских волн с одной и той же круговой частотой  $\omega$ , но с разл. направлениями волнового вектора  $\mathbf{k}$ . Осн. характеристикой падающего излучения является его пространственный спектр — набор амплитуд  $A(\mathbf{k})$  плоских волн, образующих в совокупности падающую волну. Абс. величина  $\mathbf{k}$  определяется частотой  $\omega$ , поэтому его компоненты не являются независимыми. При отражении от плоскости  $z = 0$  нормальная компонента  $k_z$  задаётся тангенциальными компонентами  $k_x, k_y$ :  $k_z = \sqrt{k^2 - k_x^2 - k_y^2}$ . Каждая плоская волна, входящая в состав падающего излучения, падает на границу раздела под своим углом  $\theta$  и отражается независимо от других волн. Поле  $\Phi(\mathbf{r})$  отражённой волны возникает как суперпозиция всех отражённых плоских волн и выражается через пространственный спектр падающего излучения  $A(k_x, k_y)$  и коэф. отражения  $R(k_x, k_y)$ :

$$\Phi(x, y, z) = \iint R(k_x, k_y) A(k_x, k_y) \exp(i k_x x + i k_y y + i k_z z) dk_x dk_y.$$

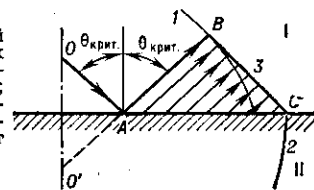
Интегрирование распространяется на область сколь угодно больших значений  $k_x$  и  $k_y$ . Если пространственный спектр падающего излучения содержит (как при

отражении сферич. волны) компоненты с  $k_x$  (или  $k_y$ ), большими  $\omega/c$ , то в формировании отражённой волны помимо волн с действительными  $k_z$  принимают участие также неоднородные волны, для к-рых  $k_z$  — чисто мнимая величина. Этот подход, предложенный в 1919 Г. Вейлем (H. Weyl) и получивший своё дальнейшее развитие в представлениях фурье-оптики, даёт последоват. описание отражения волны произвольной формы от плоской границы раздела.

При рассмотрении О. з. возможен также лучевой подход, к-рый основан на принципах *геометрической акустики*. Падающее излучение рассматривается как совокупность лучей, взаимодействующих с границей раздела. При этом учитывается, что падающие лучи не только отражаются и преломляются обычным образом, подчиняясь законам Снелля, но и что часть лучей, падающих на поверхность раздела под определёнными углами, возбуждает т. н. боковые волны, а также вытекающие поверхностные волны (Рэля и др.) или вытекающие волноводные моды (Лэмба волны и др.). Распространяясь вдоль поверхности раздела, такие волны вновь переизлучаются в среду и участвуют в формировании отражённой волны. Для практики осн. значение имеет отражение сферич. волн, коллимированных акустич. пучков конечного сечения и фокусированных звуковых пучков.

**Отражение сферических волн** [1—3]. Картина отражения сферич. волны, создаваемой в жидкости I точечным источником  $O$ , зависит от соотношения между скоростями звука  $c_1$  и  $c_2$  в соприкасающихся жидкостях I и II (рис. 7). Если  $c_1 > c_2$ , то критич. угол отсутствует

Рис. 7. Отражение сферической волны на границе раздела двух жидкостей:  $O$  и  $O'$  — действительный и мнимый источники; 1 — фронт отражённой сферической волны; 2 — фронт преломлённой волны; 3 — фронт боковой волны.



и отражение происходит по законам геом. акустики. В среде I возникает отражённая сферич. волна: отражённые лучи пересекаются в точке  $O'$ , образуя мнимое изображение источника, а волновой фронт отражённой волны представляет собой часть сферы с центром в точке  $O'$ .

Когда  $c_2 > c_1$  и имеется критич. угол  $\theta_{\text{крит}}$ , в среде I помимо отражённой сферич. волны возникает ещё одна компонента отражённого излучения. Лучи, падающие на границу раздела под критич. углом  $\theta_{\text{крит}}$ , возбуждают в среде II волну, к-рая распространяется со скоростью  $c_2$  вдоль поверхности — раздела и переизлучается в среду I, формируя т. н. боковую волну. Её фронт образуют точки, до к-рых в один и тот же момент времени дошли лучи, вышедшие из точки  $O$  вдоль  $OA$  и затем перешедшие снова в среду I в разл. точках границы раздела от точки  $A$  до точки  $C$ , в к-рой в этот момент находится фронт преломлённой волны. В плоскости чертежа фронт боковой волны представляет собой прямоугольный отрезок  $CB$ , наклонённый к границе под углом  $\theta_{\text{крит}}$  и простирающийся до точки  $B$ , где он смыкается с фронтом зеркально отражённой сферич. волны. В пространстве фронт боковой волны представляет собой поверхность усечённого конуса, возникающего при вращении отрезка  $CB$  вокруг прямой  $OO'$ . При отражении сферич. волны в жидкости от поверхности твёрдого тела подобная же конич. волна образуется за счёт возбуждения на границе раздела вытекающей рэлеевской волны. Отражение сферич. волн — один из основных эксперим. методов геоакустики, сейсмологии, гидроакустики и акустики океана.

**Отражение акустических пучков конечного сечения** [1, 3, 7, 12]. Отражение коллимированных звуковых пучков, волновой фронт к-рых в осн. части пучка близок к плоскому, происходит для большинства углов падения