

УДК 534.31.1

ОБ ОДНОЙ МОДЕЛИ ВОЛНОВОДНОГО СЛОЯ, ЛЕЖАЩЕГО НА ПОЛУПРОСТРАНСТВЕ С ДРУГОЙ СКОРОСТЬЮ РАСПРОСТРАНЕНИЯ

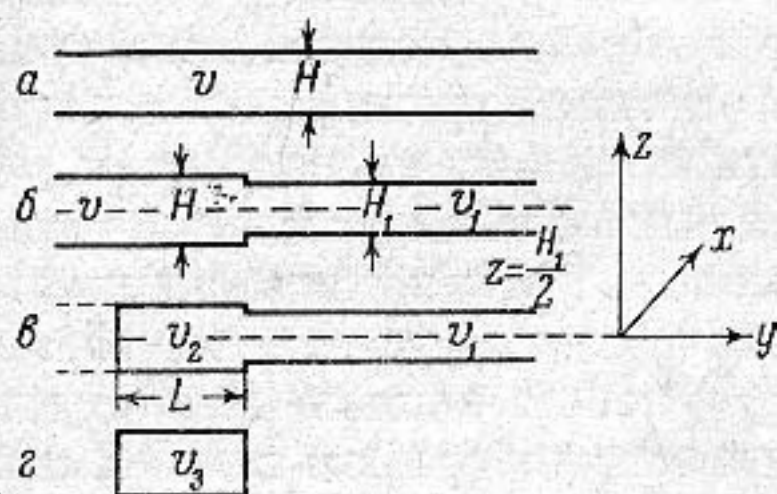
Гун Сю-фэнъ, В. К. Кузнецов

Приводятся результаты опробования модели известной гидроакустической задачи распространения звука в мелкой воде. Путем применения растровой записи амплитудной и фазовой характеристик поля получены наглядные картины волнового поля, свидетельствующие о том, что все характерные особенности распространения звука в мелкой воде наблюдаются на использованной модели.

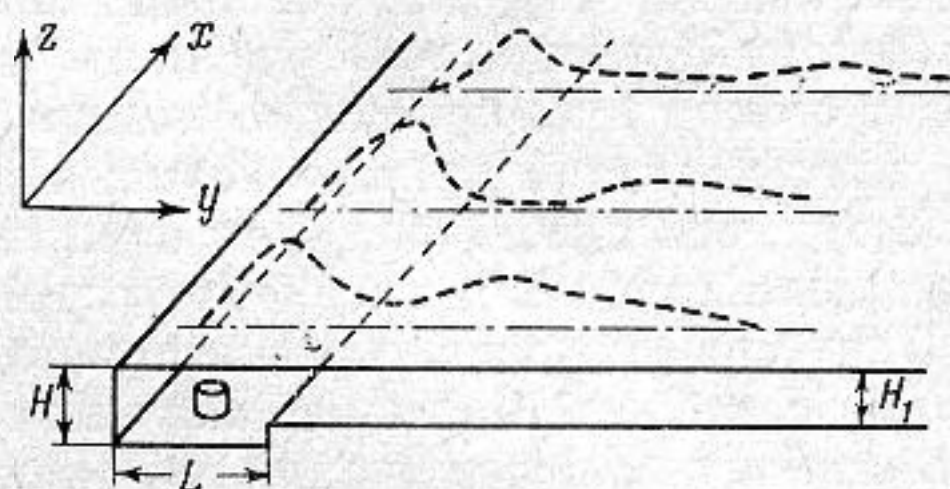
Гидроакустическая задача о распространении звука в мелкой воде формулируется следующим образом [1]: однородный плоский слой жидкости с акустически мягкой верхней границей лежит на однородном жидком полупространстве, описываемом другими (чем слой) акустическими параметрами. Физическая реализация такой модели в лабораторных условиях методом геометрического подобия в силу ряда обстоятельств представляется весьма затруднительной. Нами была использована для этой цели аналоговая модель, предложенная в свое время одним из авторов [2]. В этой модели используется аналогия между распространением волн в неоднородных средах и распространением нормальных волн в волноводах переменного сечения, которая рассматривалась рядом авторов и, в частности, Краснушкиным [3].

В соответствии с двухмерным характером моделируемой задачи за основу модели взят плоский волновод. В плоском волноводе, образованном двумя параллельными плоскими границами, отстоящими друг от друга на расстоянии H (фиг. 1, а), распространение нормальной волны происходит по законам распространения цилиндрической (плоской в частном случае) волны в однородном неограниченном пространстве. В работе [4], по-видимому, впервые было показано, что это обстоятельство можно использовать для постановки экспериментов по дифракции, рассеянию и отражению цилиндрических волн от цилиндрических объектов в плоском волноводе, что в силу ряда причин оказывается гораздо целесообразнее, чем постановка этих экспериментов в «неограниченном» пространстве. Очевидно, что в этом случае плоский однородный волновод служит моделью однородного неограниченного пространства. Фазовая скорость нормальной волны определяется соотношением между H и длиной волны в свободном пространстве λ_0 . В акустическом волноводе, образованном мягкими границами, что имело место в нашем эксперименте, $V = V_0[1 - (m\lambda_0/2H)^2]^{-1/2}$. Модель плоской границы раздела двух однородных полупространств с разными скоростями распространения волн V и V_1 представляется по этой аналогии в виде ступенчатого перехода от волновода сечения H к волноводу сечением H_1 , как показано на фиг. 1б. При выполнении определенных условий можно ожидать, что измерение распределения амплитуды и фазы колебаний в плоскости (x, y) при прохождении одной нормальной волны через линию со-

членения волноводов даст картину, подобную той, что получается для соответствующего случая прохождения волны через плоскую границу раздела двух сред, описываемую показателем преломления $n = [1 - (m\lambda_0 / 2H_1)^2]^{1/2} / [1 - (m\lambda_0 / 2H)^2]^{1/2}$. О строгой аналогии между распространением нормальных волн в волноводах переменного сечения и распространением волн в неоднородных средах можно говорить лишь в специальных случаях, когда



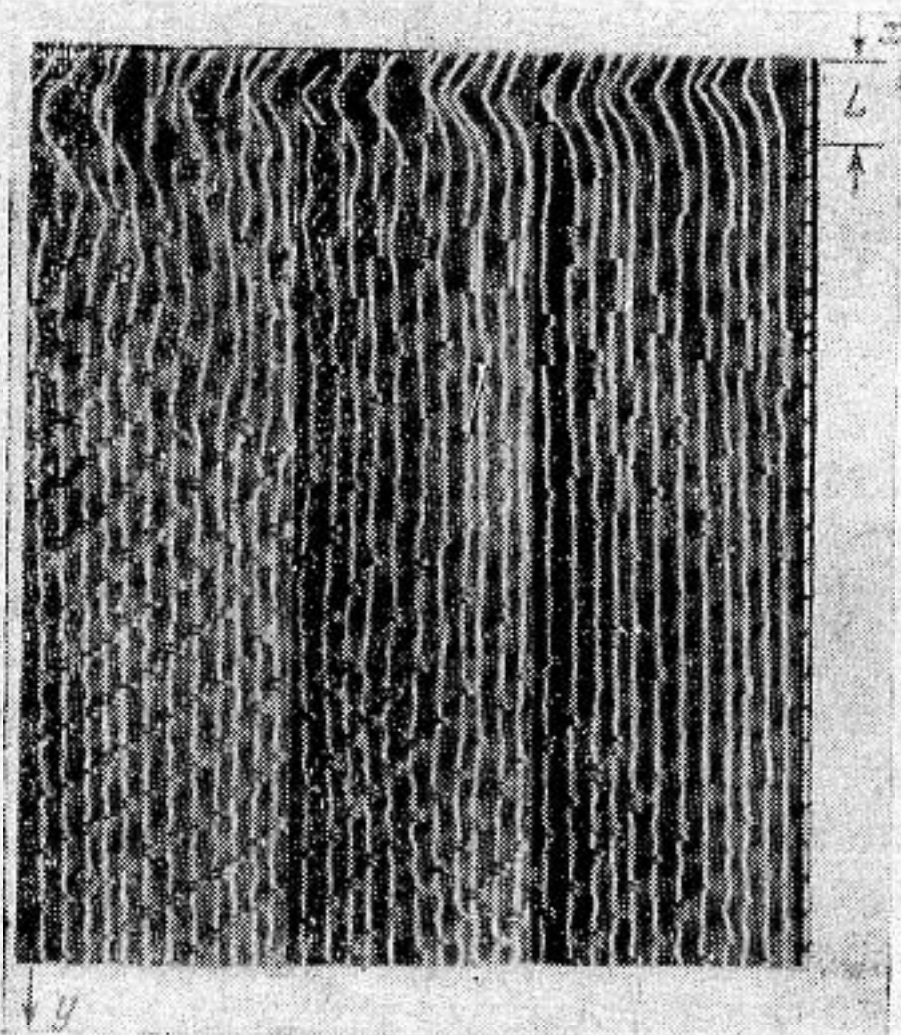
Фиг. 1



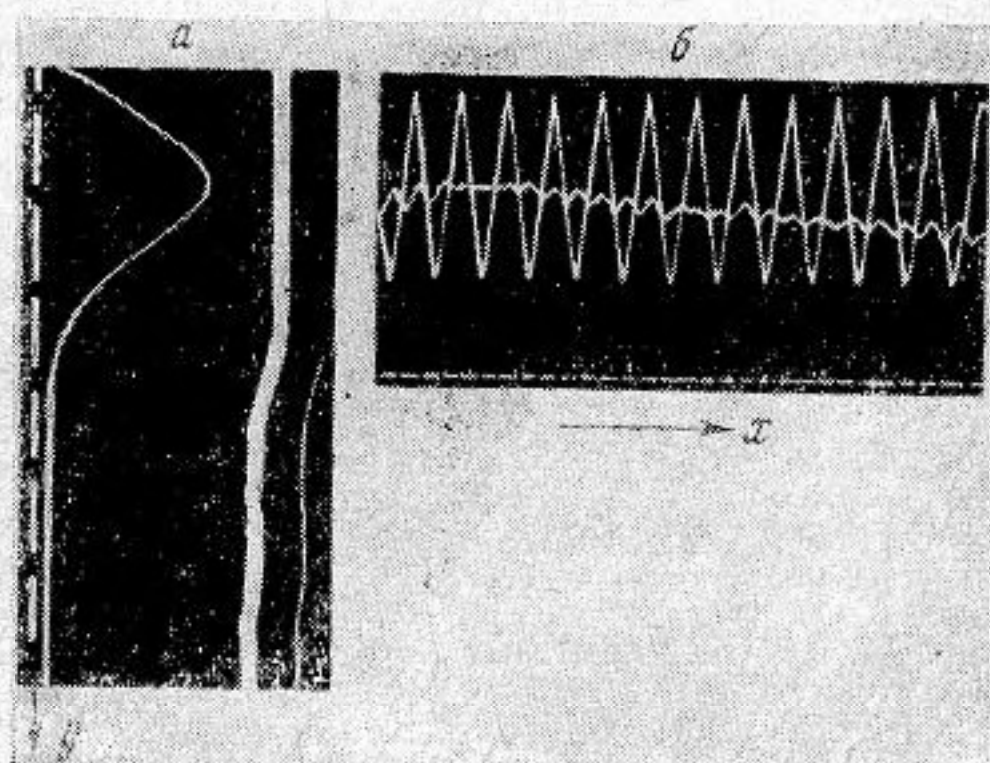
Фиг. 2

характер изменения величины сечения волновода обуславливает отсутствие взаимодействия между нормальными волнами различных порядков. Данный случай скачкообразного изменения сечения, обуславливающий трансформацию нормальных волн в месте ступенчатого перехода, к указанной категории заведомо не относится; поэтому требуется выполнение условия

$H < \lambda_0$, запрещающего возбуждение незатухающих нормальных волн всех порядков выше первого. При выполнении этого условия можно считать, что практически всюду мы имеем дело лишь с одной первой нормальной вол-



Фиг. 3



Фиг. 4

ной, так что указанная аналогия сохраняется и при скачкообразном переходе. Модель гидроакустической задачи — слой толщины L на полупространстве — получается из модели (см. фиг. 1, в), если выделить из одного волновода полосу шириной L при помощи отражающей перегородки, помещенной параллельно линии ступенчатого перехода на расстоянии L от нее, как изображено на фиг. 1, в. При этом, в соответствии с условиями задачи, перегородка, имитируя поверхность воды, должна быть акустически мягкой. Следует помнить, что вертикальной плоскости в натуре соответствует горизонтальная плоскость на модели. В зависимости от того, ставится ли перегородка в волноводе с меньшей фазовой скоростью V или большей V_1 ,

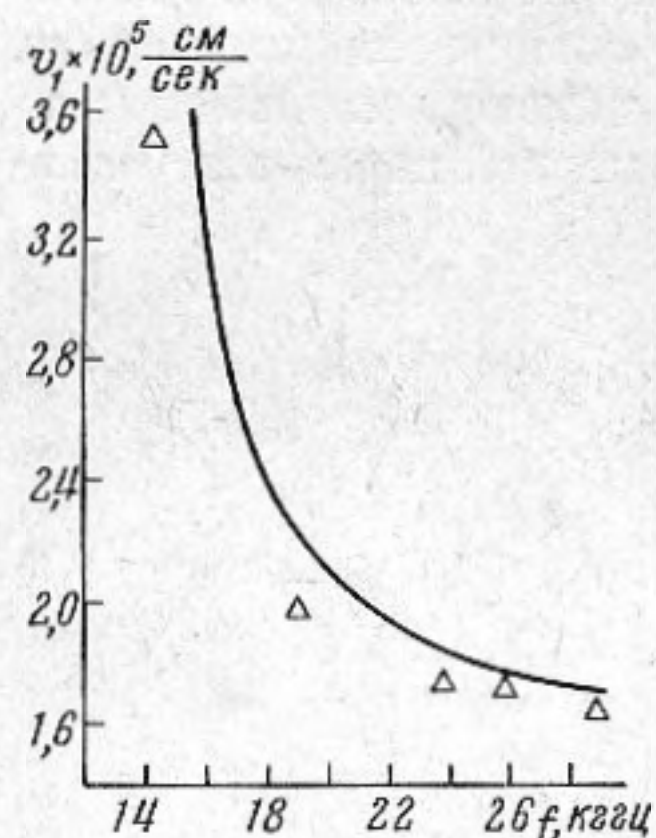
реализуется модель волноводного распространения в слое или антиволноводного распространения.

Эксперимент проводился в гидроакустическом бассейне. Плоские волноводы сечения H и H_1 создавались акустически мягкими границами — поверхностью воды и горизонтально подвешенными в воде на глубинах H и H_1 ровными площадками с мягким покрытием на их рабочей поверхности (фиг. 2). Вдоль линии стыка площадок ставилась плоская, акустически мягкая перегородка. Реализованная таким образом модель, в которой ступенчатый переход имеется лишь на одной нижней границе волновода, теряет симметрию, присущую модели 1, в, относительно плоскости (x, y) , что при небольшой разнице величин H , H_1 и выполнении условия (1) не столь существенно. Отражения от краев волновода устранялись специальными волноотводами, предусмотренными конструкцией установки [5].

При опытах использовался метод непрерывной записи амплитуды и фазы колебаний на кинолентку шлейфовым осциллографом МПО-2 при автоматическом перемещении звукоприемника вдоль параллельных трасс. Запись велась двумя осциллографами — на одном из них амплитуда и фаза записывались, как обычно, отдельными шлейфами на всю ширину пленки, на другом осуществлялась растровая запись амплитуды и волновых фронтов, представляющая собой своего рода визуализацию волнового поля [5]. На растровых осциллограммах (фиг. 3 и 7), линии вдоль строк растров являются графиками распределения амплитуды звукового давления вдоль выбранных трасс. В одних случаях трассы выбирались параллельными оси y , в других — оси x (y -трассы и x -трассы соответственно). Расположение y -трасс и примерное распределение звукового давления на них показаны на фиг. 2. Линии волновых фронтов на растрах отмечены точками

(короткими штрихами), следующими с интервалами в одну длину волны.

На фиг. 3 представлен растр, составленный из строк по y -трассам (y -растр) для случая волноводного распространения. На нем четко выражены фронты преломленной цилиндрической волны, распространяющейся в нижнее полупространство. В слое вдоль оси x , распространяется одна нормальная волна 1-го порядка. Ее волновые фронты, расположенные перпендикулярно оси x , не регистрируются на y -растре из-за того, что трассы проходят между регистрируемыми фронтами, не пересекая их. На фиг. 4, а представлена крупномасштабная запись распределения амплитуды и фазы вдоль y -трассы (пунктирная линия — шкала расстояний). Неизменность фазы (жирная кривая) вдоль трассы свидетельствует о том, что фронт волны расположен вдоль трассы, а синусоидаль-

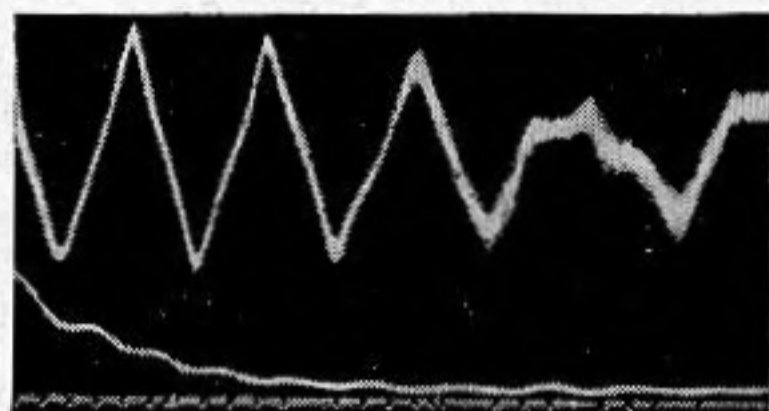


Фиг. 5

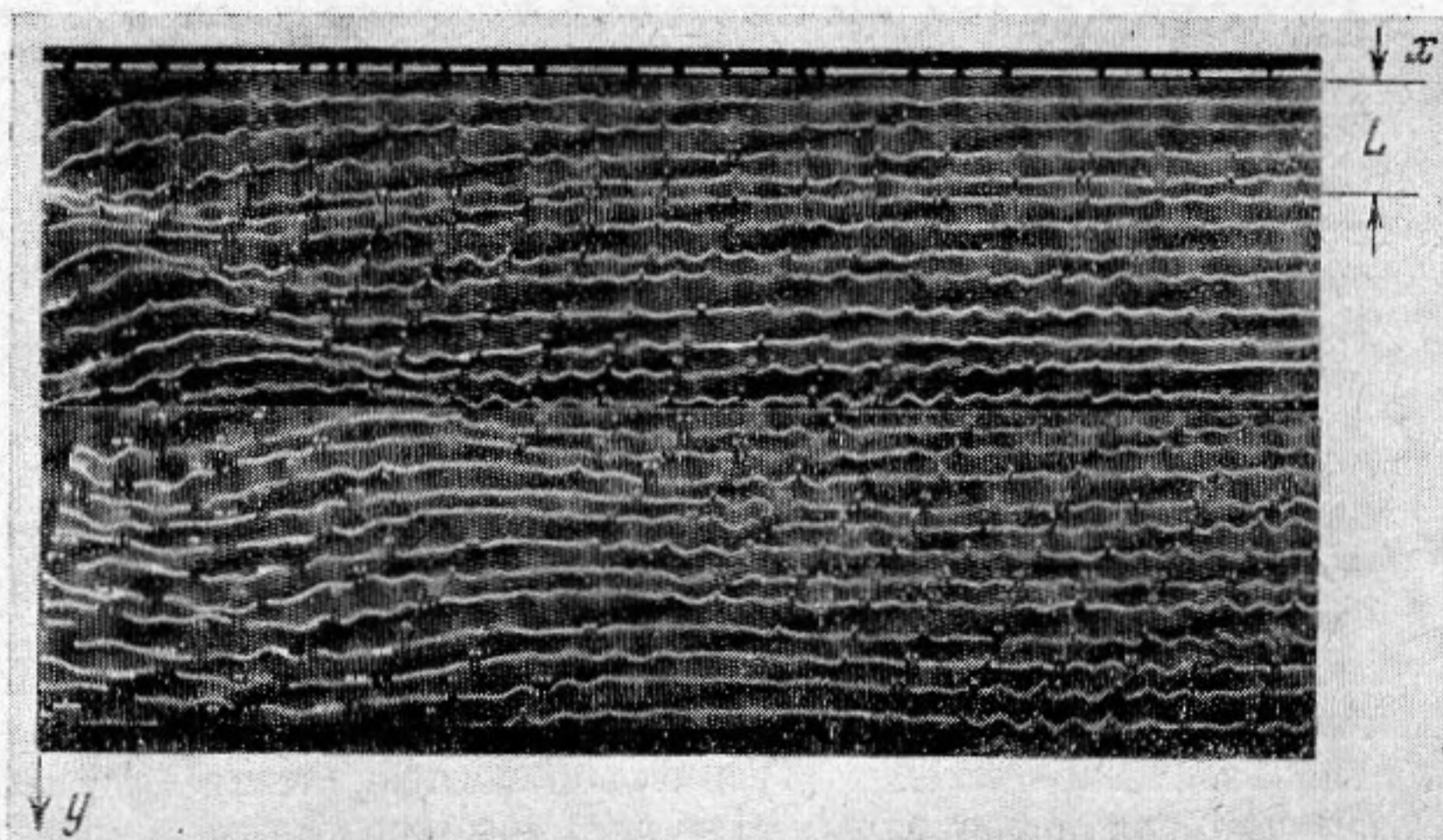
ное распределение амплитуды звукового давления (тонкая кривая), с узловой линией на «верхней» границе слоя и спадом по экспоненциальному закону при углублении в «нижнюю» среду, соответствуют характеру первой нормальной волны в волноводном слое, лежащем на полупространстве. На другой крупномасштабной осциллограмме фиг. 4, б, снятой по оси x волноводного слоя, пилообразная линия дает изменение фазы вдоль слоя. Линейно-пилообразный вид фазовой записи с периодом в одну длину волны (величина расстояния между соседними пиками) характеризует чисто бегущую волну. Спад амплитуды, наблюдающийся на этой осциллограмме по мере удаления от источника обусловлен поглощением в стенках волновода и наличием рассеяния из-за некоторой шероховатости последних.

На фиг. 5 приведены данные, характеризующие дисперсию первой нормальной волны. Треугольниками обозначены экспериментальные точки.

Для сравнения приведена теоретическая кривая дисперсии первой нормальной волны в четырехугольном волноводе с сечением, показанным на фиг. 1, г. Как и следовало ожидать, экспериментальные точки дисперсионной кривой волновода 1, в лежат ниже теоретической дисперсионной кривой волновода 1 г. Осциллограммы для случая «антиволноводного» распространения приведены на фиг. 6 и 7. Поскольку в этом случае не выполняются условия полного внутреннего отражения, в слое отсутствуют незатухающие нормальные волны; наблюдается быстрое спадание уровня звукового давления с расстоянием от источника (фиг. 6), обусловленное постоянной утечкой энергии через границу в нижнее полупространство. В нижнем полупространстве наблюдается распространение двух волн, разделенных между собой зоной тени (фиг. 7). Волна, примыкающая к слою, имеет плоские фронты, следы которых в плоскости чертежа являются прямыми линиями, расположенными под углом к оси слоя*. Эта волна подобна головной или боковой волне, хорошо из-



Фиг. 6



Фиг. 7

вестной в сейсмологических исследованиях. Угол наклона фронтов к оси канала, подобно углу Маха, определяется отношением скоростей распространения в слое V_2 и нижнем полупространстве V_1 и равен $\arcsin V_1/V_2$. Вторая волна имеет цилиндрический фронт и является обычной преломленной волной.

Авторы благодарят В. А. Красильникова за внимание к работе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Л. М. Бреховских. Волны в слоистых средах. М., Из-во АН СССР, 1957.
2. В. К. Кузнецов. Отчет кафедры акустики физического факультета МГУ, 1958.
3. П. Е. Краснушкин. Метод нормальных волн в применении к волноводам и их алгебраическим прообразам (доктор. диссертация), МГУ, 1945.
4. К. Тамм. Ein und Zweidimensionale Ausbreitung von Wasserschall im Rohr bzw. im Flachgedan. Akust. Zeits., 1941, 1, 16.
5. В. К. Кузнецов. Экспериментальная установка для исследования волновых полей в неоднородных средах методом аналогового моделирования. Акуст. ж., 1966, 12, 4, 457—462.

Кафедра акустики
Московского государственного университета

Поступила в редакцию
14 апреля 1965 г.

* По мере распространения волны в плоском волноводе фронт волны начинает «портиться»: появляются искривления линии фронта из-за неидеальной однородности нижней границы. Этим и обусловлен заметный излом фронта головной волны.