

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ПЕРЕХОДНЫХ СЛОЕВ

Г. И. Каминир, Б. Д. Тартаковский

Экспериментально исследован метод акустического «просветления» на границах акустически различных сред при помощи переходных слоев. Показана возможность увеличения коэффициента звукопроницаемости границы алюминия и воды до 98—99% и коэффициента звукопроницаемости стальных пластин в воде до 0,90—0,92. Применение двойных переходных слоев позволило существенно расширить полосу звукопроницаемости стальных пластин.

Одним из авторов были исследованы условия создания полной звукопроницаемости границы двух акустически различных сред и разработана теория звуковых переходных слоев [1, 2].

В дальнейшем были поставлены опыты, имеющие целью экспериментальную проверку теоретических выводов и осуществление переходных слоев, позволяющих «просветить» границы некоторых часто встречающихся в ультразвуковой технике пар акустических сред. Ниже приводится часть полученных нами данных*.

Аппаратура и методика измерения

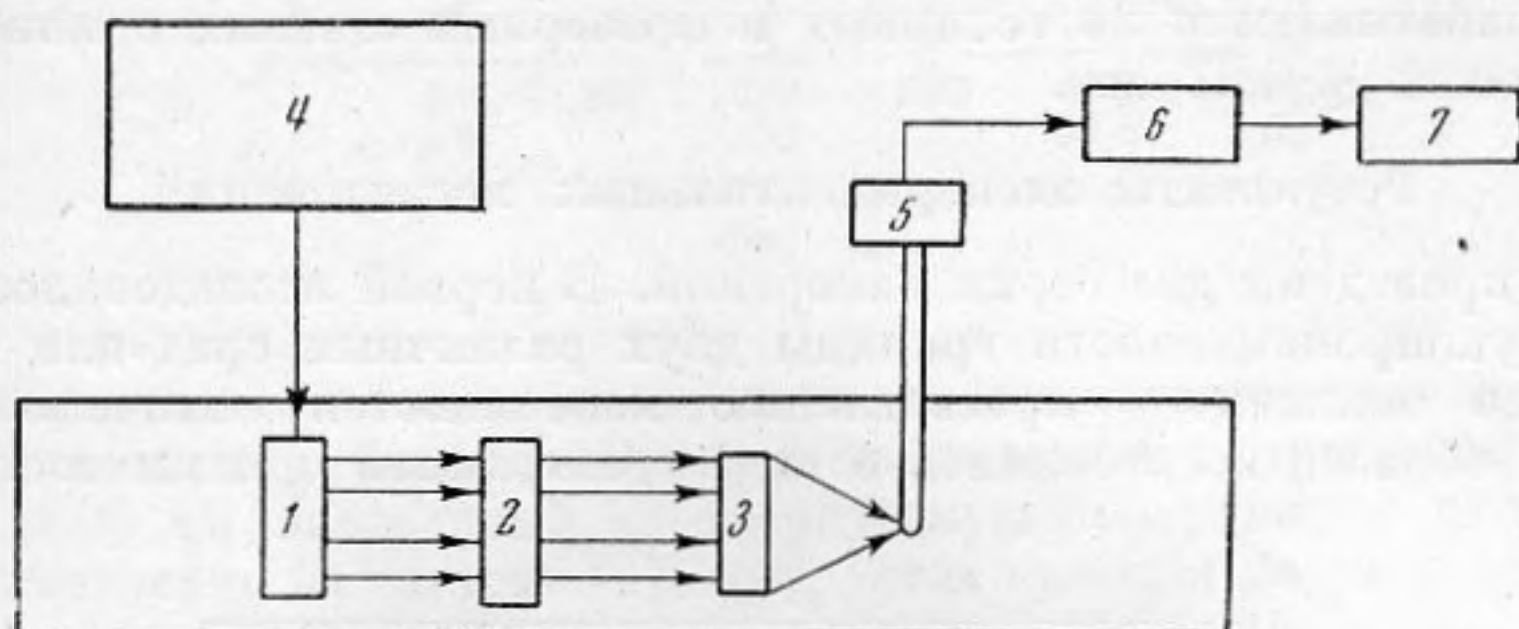
Измерения производились в области частот 500—2000 кГц. Исследовались переходные слои, нанесенные на плоские, цилиндрические и сферические поверхности. В качестве просветляемых образцов были взяты плоско-параллельные пластины, цилиндрические и сферические фокусирующие линзы. Для точной количественной оценки эффективности звуковых переходных слоев оптические методы наблюдения ультразвуковых полей, несмотря на их наглядность и простоту, неприменимы. Поэтому измерения производились при помощи электроакустического измерительного тракта. Средняя случайная ошибка составляла 0,1 дБ.

В латунном сосуде, размером $100 \times 25 \times 25$ см, заполненном водой, были установлены излучатель, исследуемый образец и приемник-щуп с акустической фокусирующей линзой (фиг. 1). Плоский излучатель 1 диаметром 40 мм устанавливался на расстоянии 20 см от измеряемого образца 2; в этих пределах волновой фронт при частотах 1000—2000 кГц еще сохраняет плоскую форму. При измерении плоских образцов приемник помещался в фокус вспомогательной ультразвуковой плоско-сферической фокусирующей линзы 3. Это позволяло подавить помехи, получавшиеся в связи с отражением звуковых волн от не полностью заглушенных стенок сосуда. Применение линзы позволяло также «автоматически» усреднять результаты измерения по всему сечению волнового пучка. Заметим, что если бы вместо линзы применялся ультразвуковой плоский приемник того же диаметра, что и линза, подавление помех и усреднение были бы такие же, как и при помощи линзы. Однако при этом вследствие отражения от приемника возникли бы стоячие волны, которые исказили бы результаты опыта. Примененная же звуковая линза была сделана из плексигласа, для кото-

* Работа выполнялась в 1951—1955 гг.

рого коэффициент отражения по давлению в воде составляет 0,01. Для ослабления стоячих волн между излучателем и образцом устанавливалась пластина, выполненная из материала, обладающего большим поглощением ультразвука. Коэффициент звукопроницаемости D плоских пластин с нанесенными на них переходными слоями определялся путем сравнения звуковых давлений, измеренных в присутствии пластины и без нее.

Измерения с переходными слоями, нанесенными на призмы и линзы, носили относительный характер: в поле плоской звуковой волны вставлялись поочередно «просветленные» и затем для сравнения такие же непросветленные испытуемые образцы. Выигрыш, даваемый просветлением, определялся отношением измеренных электрических напряжений V_1/V_0



Фиг. 1. Схема установки: 1 — излучатель, 2 — измеряемый образец, 3 — линза, 4 — генератор, 5 — щуп, 6 — усилитель, 7 — индикатор

где V_1 — величина электрического напряжения на выходе измерительного тракта (пропорциональная звуковому давлению) при измерениях просветленного образца, V_0 — непросветленного образца. При измерении переходных слоев, нанесенных на линзы, приемник помещался в фокус соответствующей линзы и выигрыш определялся путем сопоставления с линзой-эталоном (без переходного слоя).

Изготовление переходных слоев

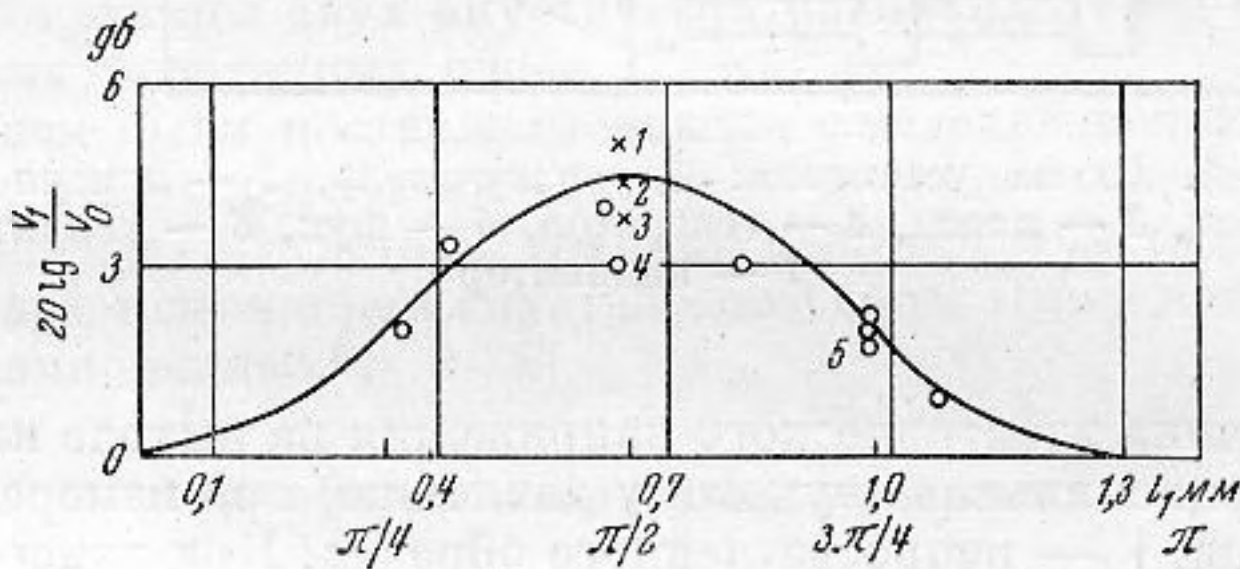
Для изготовления твердых переходных слоев могут быть использованы разнообразные материалы: металлы, пластмассы, лаки. Форма просветляемого образца и расчетная частота просветления обуславливают разные способы изготовления переходных слоев. При работе на частотах 1000 кГц и ниже, когда толщина просветляемого слоя $\lambda/4$ составляет несколько десятых миллиметра, переходные слои могут изготавливаться в виде пластин, приклеиваемых к образцу.

Такие плоские пластины толщиной 0,2–1,2 мм были изготовлены из плексигласа, толщиной 0,25–0,7 мм — алюминия и электрона. Как показывает расчет на частоте 1000 кГц, толщина слоя клея практически не оказывает влияния, если она не превышает 0,02 мм. В опытах это достигалось применением карбинольного клея или клея БФ-2 с полимеризацией под давлением. Некоторые трудности вызвало изготовление переходных слоев из плексигласа для сферических поверхностей. Метод горячей пресовки оказался непригодным, так как при остывании тонкие переходные слои коробились. Лучшие результаты дал следующий способ холодной обработки. На токарном станке изготавливались плосковыгнутая металлическая и плосковыпуклая плексигласовая линзы с одинаковыми радиусами кривизны. После склейки под давлением плексигласовая линза протачивалась до тех пор, пока не оставался сферический слой заданной толщины.

Слой толщиной до 1 мм были изготовлены с ошибкой $\pm 0,01$ мм. Недостатком этого способа является сложность изготовления и значительные потери материала, что ограничивает его применение для изготовления переходных слоев к большим образцам. Для нанесения переходных слоев на большие сферические поверхности были испытаны методы распыления при помощи пульверизатора различных лаков и нанесения их кистью с последующей просушкой и полимеризацией. Метод распыления оказался непригодным из-за появления воздушных пузырьков в толще слоя. Нанесением кистью удавалось получать слой удовлетворительного качества, толщиной 0,005 мм и более. Однако этот способ требует затраты большого времени для изготовления слоев толще 1 мм. Полученные таким способом слой из бакелитового лака и клея БФ-2, после полимеризации легко обрабатываются на токарных и фрезерных станках с ошибкой, не превышающей $\pm 0,02$ мм.

Результаты экспериментальных исследований

Были проведены две серии измерений. В первой исследовалось повышение звукопроницаемости границы двух различных сред для бегущей волны, что аналогично просветлению поверхностей оптических линз. При этом образец изготовлялся в виде трехгранной призмы или плоско-



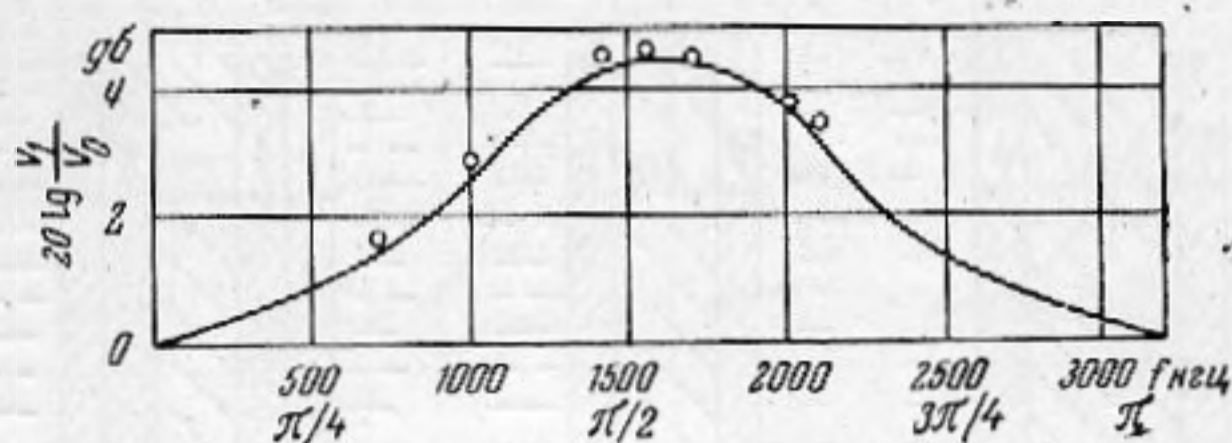
Фиг. 2

сферической линзы, что ослабляло влияние интерференции внутри образца на результат измерений. Такой прием позволял рассматривать действия просветляющих слоев, нанесенных на обе стороны образца, независимо друг от друга. Во второй серии измерений определялось повышение звукопроницаемости твердых плоско-параллельных пластин, расположенных в жидкой среде. Это явление характерно только для акустических задач, так как здесь имеет место суммарная интерференция волн от всех границ пакета, состоящего из просветляемой пластины и двусторонних переходных слоев.

Первая серия измерений была выполнена с переходными слоями, сделанными из пластмасс. В начале исследовалось просветление алюминиевой трехгранной призмы. С этой целью на одну из ее сторон была наклеена плексигласовая пластина, толщиной $0,65 \pm 0,01$ мм, рассчитанная на просветление при частоте 1000 кГц (сплошная кривая на фиг. 2). При замене простой призмы на просветленную, уровень звукового давления на расчетной частоте повысился в среднем на $4,3 \pm 0,3$ дБ (точки 1, 2, 3 на фиг. 2). Затем на другую сторону призмы была наклеена такая же плексигласовая пластина; при этом выигрыш увеличился до $7,7 \pm 0,1$ дБ. Согласно расчету [2] этот выигрыш должен быть равен 8,5 дБ. Было измерено просветляющее действие плексигласовых пластин различной толщины. Для этого пластины толщиной от 0,3 мм, до 1,1 мм поочередно прикладывались к плоской поверхности плоскосферической линзы. На фиг. 2 кружки в верхней половине графика обозначают экспериментальные данные, сплошная кривая — расчетные значения. Согласие между расчетными и опытными данными можно считать удовлетворительным. В процессе

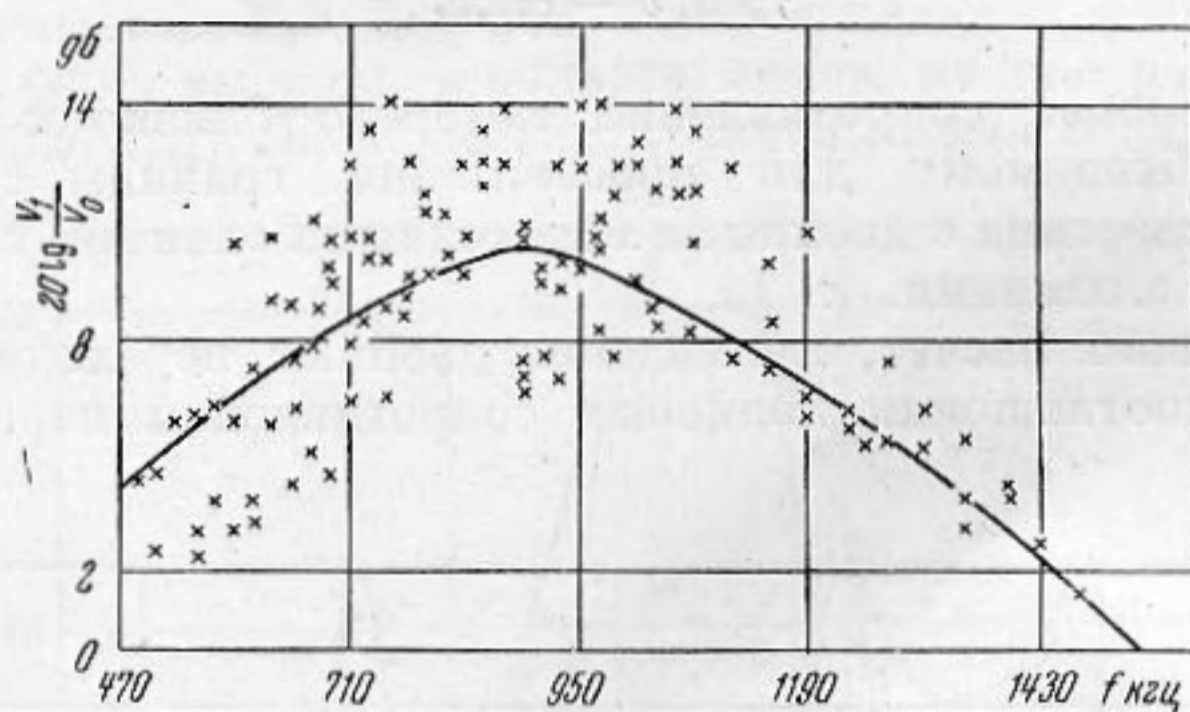
экспериментирования было замечено, что эффект увеличения звукопроницаемости можно получить без непосредственного контакта плексигласовой пластины с линзой, устанавливая ее на расстоянии нескольких полуволн от последней (точки 4 и 5 фиг. 2).

Далее исследовалось просветление сферических поверхностей алюминиевых линз. При косом падении волновых пучков на слой, его волновая



Фиг. 3

толщина уменьшается и, следовательно, частота, соответствующая максимуму просветления, увеличивается. В соответствии с этим, слой толщиной $0,47 \pm 0,0005$ мм, нанесенный на сферическую поверхность, дал наибольшее просветление на частоте 1570 кгц, тогда как при нормальном падении



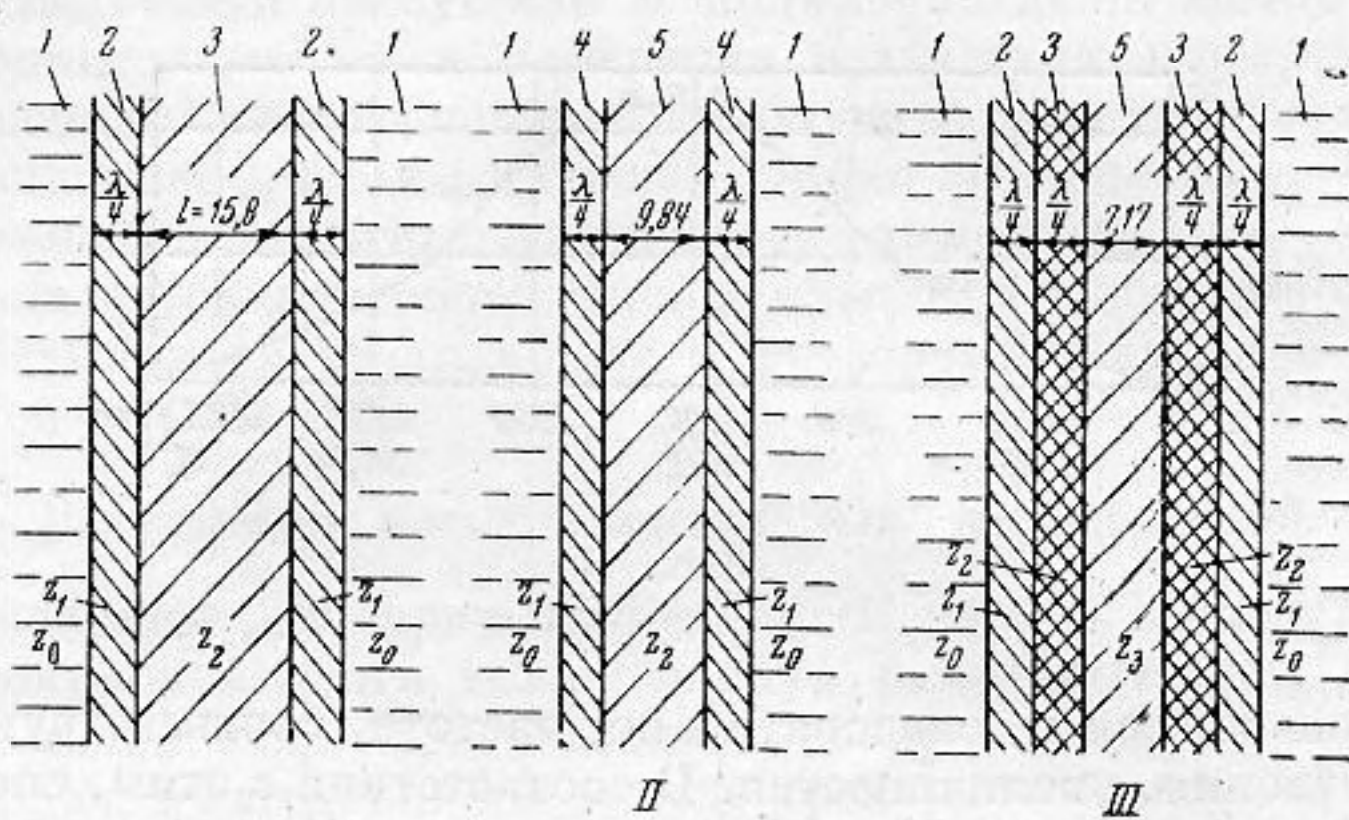
Фиг. 4

на пластину частота просветления должна была бы составлять 1400 кгц (фиг. 3). Учитывая это обстоятельство, к плоской стороне этой же линзы была приклеена плексигласовая пластина, толщиной 0,43 мм (для которой при нормальном падении максимум звукопроницаемости приходится на частоту 1570 кгц). Измеренный суммарный выигрыш $8,3 \pm 0,8$ дб, удовлетворительно совпал с расчетным значением — 8,5 дб, вычисленным с учетом потерь в обеих пластинах.

На фиг. 4 приводятся экспериментальные значения выигрыша (отмеченные точками) при двустороннем просветлении алюминиевой линзы бакелитовым лаком, нанесенным при помощи кисти. Толщина плоского слоя 0,76 мм, сферического — 0,79 мм. Средний измеренный выигрыш на частоте $f=900$ кгц без учета затухания составляет 10,5 дб. Сплошной линией показана соответствующая расчетная кривая. Обращает на себя внимание значительный разброс данных отдельных измерений, достигающий до 4 дб. Он объясняется тем, что в линзе-эталоне из-за отражения звука на границах имеет место интерференция, вследствие которой ее звукопроницаемость изменяется на разных частотах. Таким образом, измерения показали возможность применения переходных слоев из полимеризованного бакелитового лака, преимуществами которого являются

удобство нанесения и химическая стойкость по отношению к большинству жидкостей.

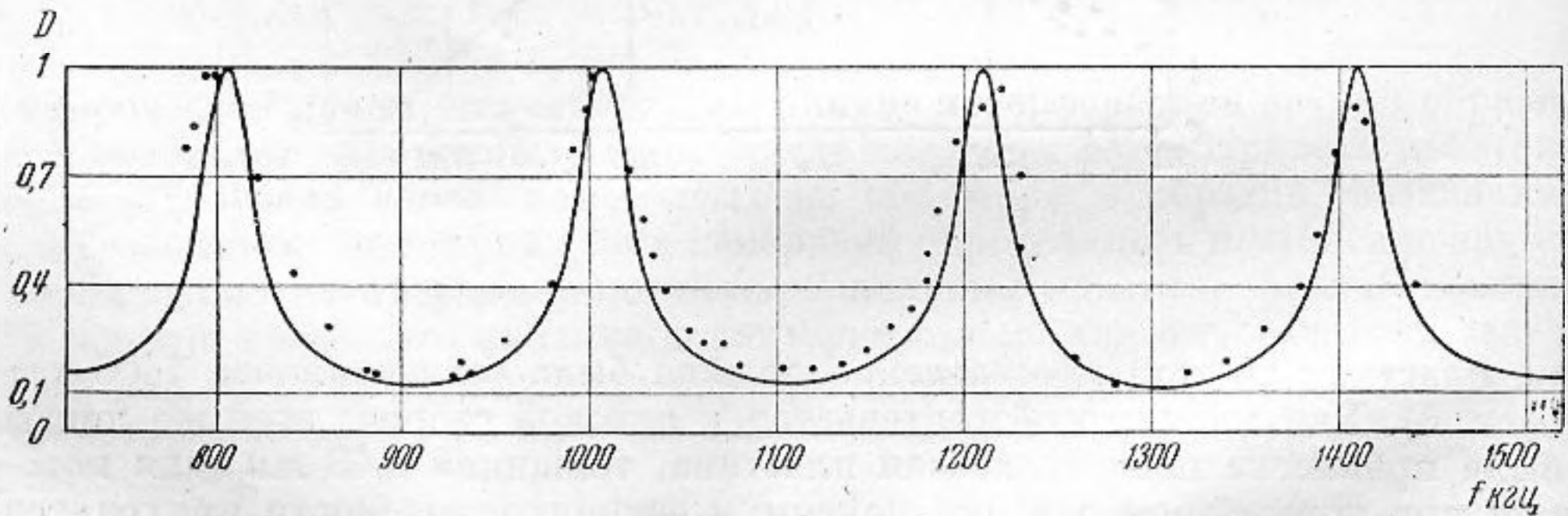
Во второй серии измерений для исследования увеличения звукопроницаемости плоскопараллельных пластин были изготовлены три пакета (фиг. 5): *I*. Алюминиевая пластина с плексигласовыми переходными слоями. *II*. Стальная пластина с переходными слоями, сделанными из



Фиг. 5. 1 — вода, 2 — плексиглас, 3 — алюминий, 4 — электрон, 5 — сталь

электрона (волновое сопротивление которого близко к оптимальному значению, необходимому для просветления границы стали и воды). *III*. Стальная пластина с двойными переходными слоями, состоящими из плексигласа и алюминия.

Как показывает расчет, применение двойных переходных слоев при определенном соотношении волновых сопротивлений переходных слоев



Фиг. 6

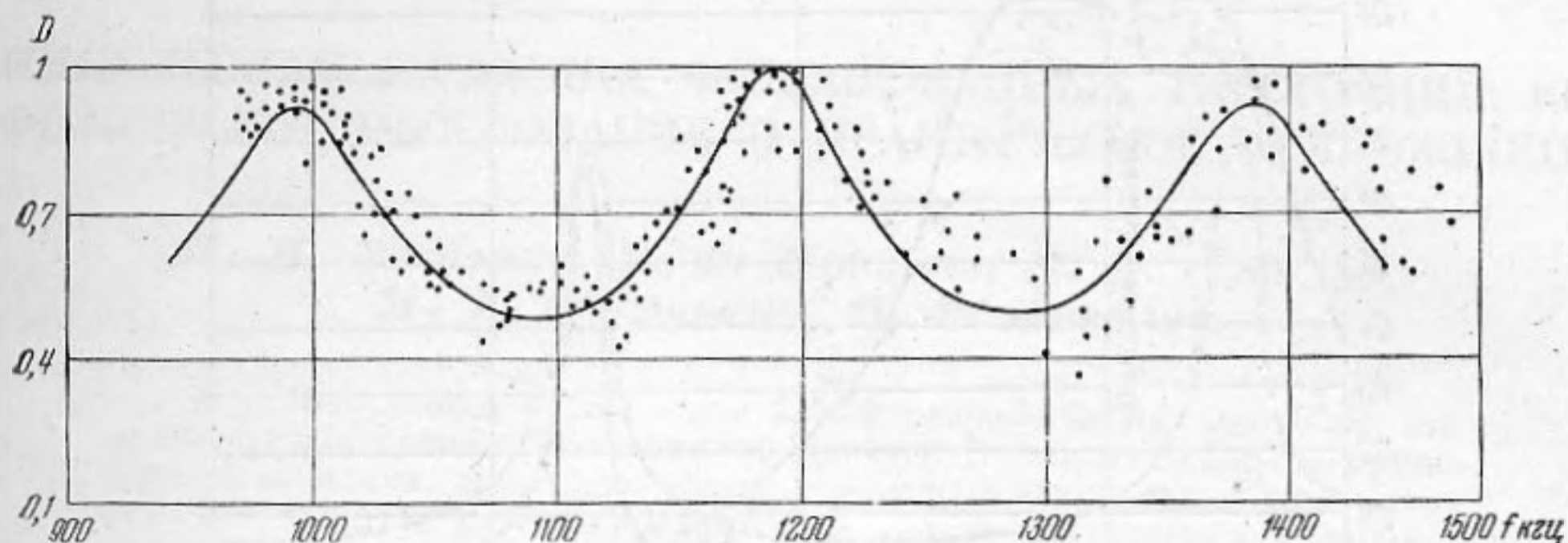
и полубесконечных сред позволяет расширить частотную полосу, в пределах которой происходит увеличение коэффициента звукопроницаемости пластины [2].

На фиг. 6 приведены результаты измерения коэффициента звукопроницаемости алюминиевой пластины до нанесения переходных слоев в воде. Расчетная кривая и экспериментальные точки (средние из пяти измерений) хорошо совпадают. Максимальный коэффициент звукопроницаемости D_{\max} близок к единице, минимальный коэффициент звукопроницаемости D_{\min} , получаемый в точках, где толщина пластины содержит нечетное число четвертей длин волн, составляет около 0,2.

На фиг. 7 приведены аналогичные результаты для пакета *I*. Минимальные значения коэффициента звукопроницаемости возросли до значения 0,5. В три-четыре раза расширилась полоса пропускания звука. Вблизи

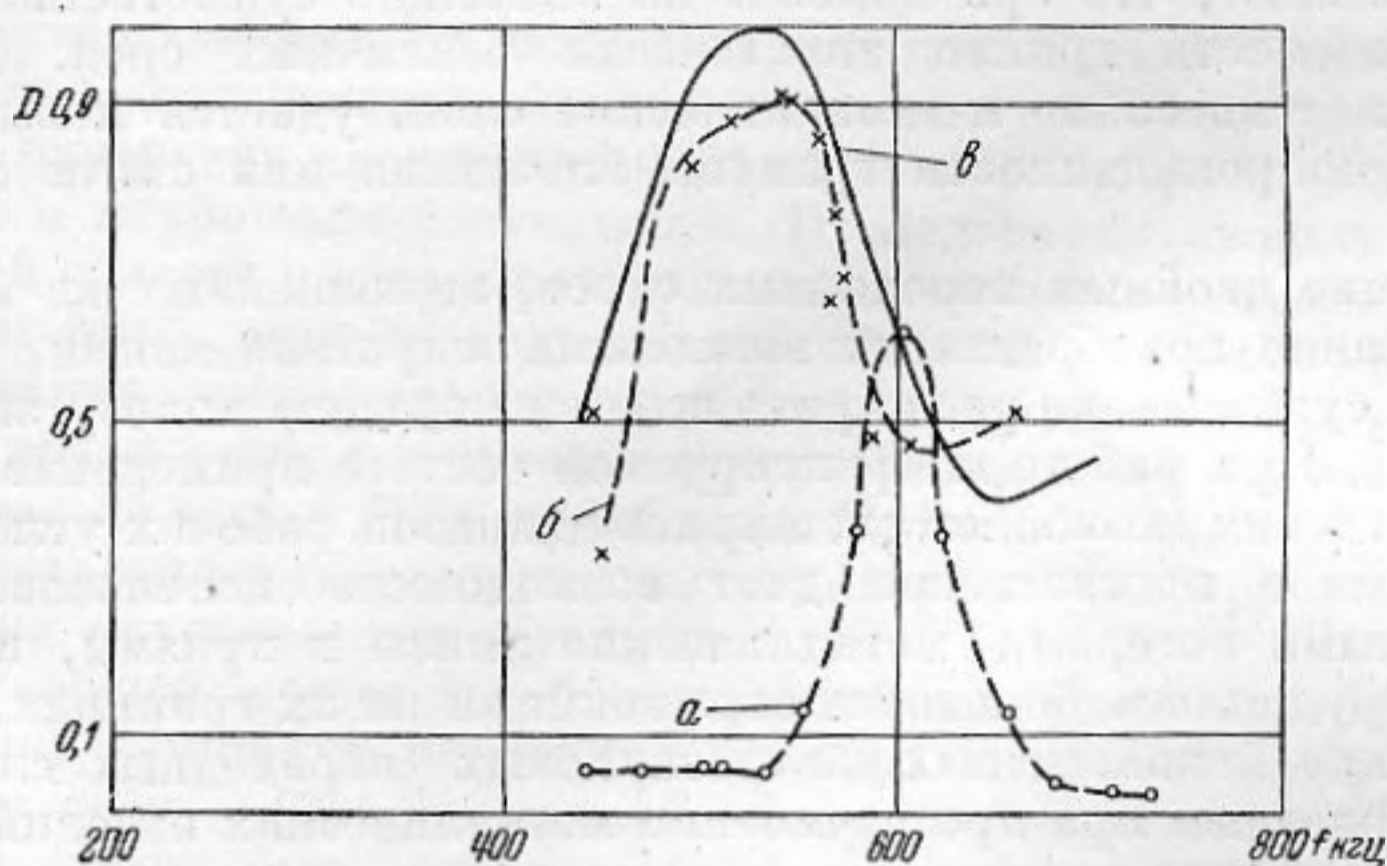
расчетной частоты наибольшего просветления ($f=1200$ кгц) величина D_{\max} попрежнему равна единице. На частотах $f=1000$ кгц и $f=1400$ кгц D_{\max} стало несколько меньше единицы (на этих частотах волновые толщины плексигласовых слоев не точно равны $\lambda/4$). Экспериментальные точки хорошо группируются вокруг расчетной кривой.

На фиг. 8 представлены результаты измерения пакета II. Экспери-



Фиг. 7

ментальная частотная характеристика D стальной пластины без переходных слоев дается кривой a . Вследствие затухания ультразвука в стали D_{\max} составляет всего 0,6. Для получения наглядных результатов частота просветления была выбрана в области минимума прозрачности стальной пластины ($f=520$ кгц). Экспериментальные значения D для пакета в целом

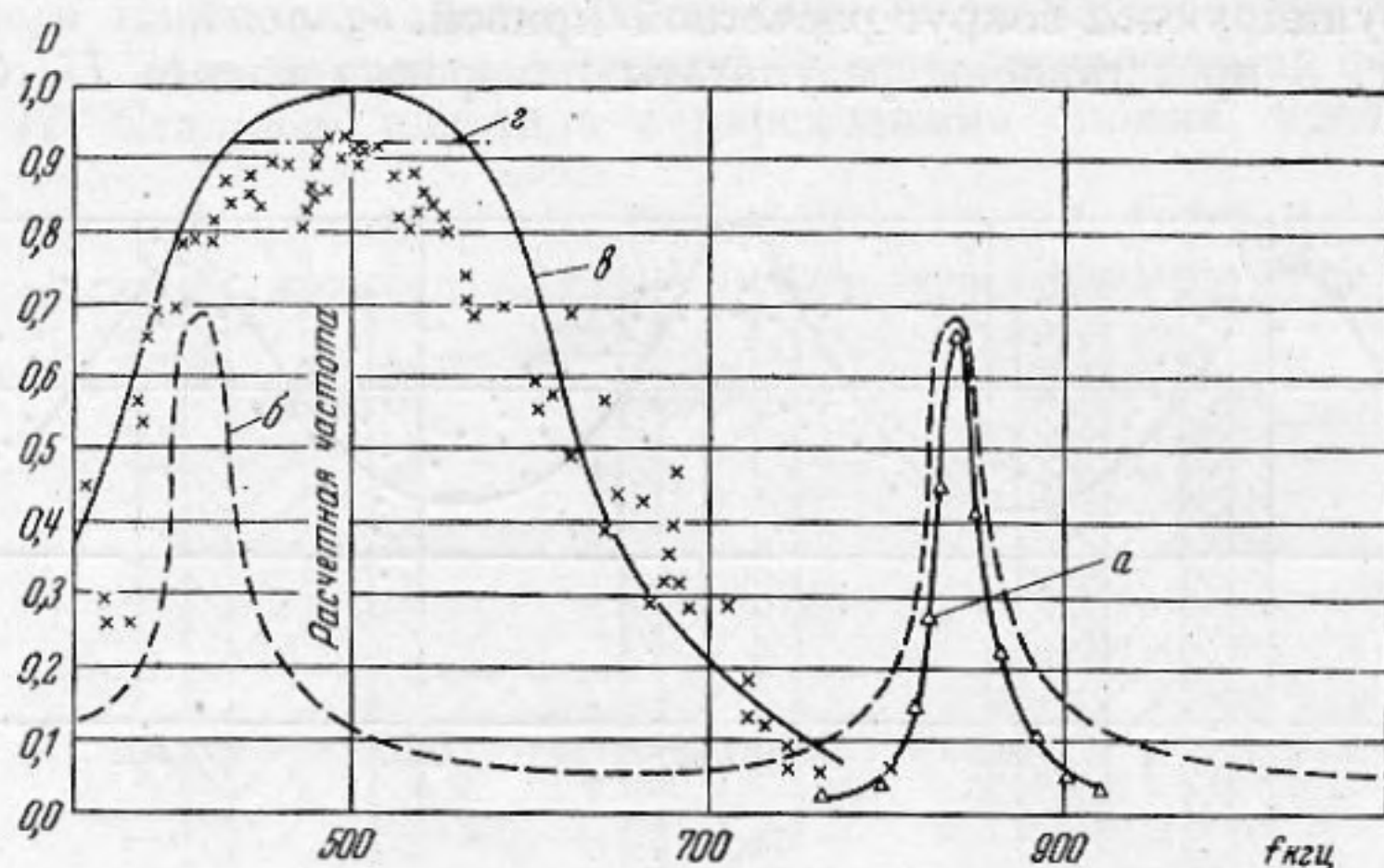


Фиг. 8

представлены кривой c , а соответствующие расчетные данные (без учета потерь) — кривой e . Коэффициент звукопроницаемости возрос до значения 0,9; полоса прозрачности пакета расширилась примерно в три раза.

На фиг. 9 даны результаты измерений пакета III. Опытные значения коэффициента звукопроницаемости стальной пластины обозначены треугольниками (a); результаты расчета с учетом потерь ультразвука в стали — кривой b ; крестиками — частотная характеристика D стальной пластины с наклеенными на нее с обеих сторон четвертволновыми алюминиевыми и плексигласовыми пластинами. Кривой c показана расчетная характеристика звукопроницаемости пакета в целом без учета затухания, горизонтальной прямой g — величина D , рассчитанная с учетом затухания во всех пластинах.

Полоса пропускания расширилась более чем в 10 раз. Существенно, что D_{\max} в обоих случаях просветления стальных пластин достигает значения 0,9—0,92. Увеличение максимального коэффициента звукопроницаемости в результате просветления можно объяснить тем, что благодаря



Фиг. 9

переходным слоям устраняется многократное отражение ультразвука внутри пластин, а следовательно, уменьшается эффективная длина пути в стали, на которой происходит затухание.

Результаты экспериментальных исследований звуковых переходных слоев показывают, что при помощи их возможно существенно повысить звукопроницаемость границ акустически различных сред. Например, применяя пластмассовые и металлические слои, удается повысить коэффициент звукопроницаемости границы алюминия или стали с водой до 98—99%.

Применение двойных переходных слоев, выполненных из материалов с соответственно подобранными волновыми сопротивлениями, позволяет, кроме того, существенно расширить еще и частотную полосу звукопроницаемости [3]. При работе на фиксируемой частоте применение двухслойного просветления позволяет расширить диапазон рабочих углов.

Акустическое просветление дает возможность использовать обладающие малыми потерями металлические линзы и призмы, применение которых затруднялось большими отражениями на их границах.

Применение неконтактных ультразвуковых переходных слоев может оказаться полезным при прозвучивании металлических изделий, расположенных в жидкости.

В измерениях принимала участие А. Д. Карюгина. Авторы выражают благодарность Л. Д. Розенбергу за внимание к работе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Б. Д. Тартаковский. К теории распространения плоских волн через однородные слои. ДАН СССР, 1950, 71, 3, 465—468.
2. Б. Д. Тартаковский. Звуковые переходные слои. ДАН СССР, 1950, 75, 1, 29—32.
3. Б. Д. Тартаковский. Способ увеличения прозрачности звуковых линз. Авторское свидетельство № 90182 от 25 июня 1949 г.

Акустический институт АН СССР
Москва

Поступила в редакцию
25 февраля 1956 г.