

Б. Д. ТАРТАКОВСКИЙ

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДИФФРАКЦИИ В ФОКУСЕ ЗВУКОВЫХ ЛИНЗ

(Представлено академиком Г. С. Ландсбергом 8 V 1951)

1. В различных областях ультразвуковой техники и экспериментального исследования начинают за последнее время применяться звуковые фокусирующие линзы. Их используют для получения видимых изображений внутренних дефектов в металлах и других материалах, для концентрации ультразвуковой энергии в целях воздействия на вещество и т. д. Они с успехом могут также быть использованы для моделирования диффракционных явлений, сопутствующих фокусировке световых волн.

Хотя в общих чертах расчетные соотношения для звуковых линз могут быть получены из теории оптических линз, существенные отличия звуковых линз потребовали их специального рассмотрения^(1,2). Из-за значительных математических трудностей, возникающих при рассмотрении диффракционной структуры фокуса в совокупности с абберациями линзы существенное значение приобретает экспериментальное изучение звуковых линз.

Несмотря на то, что эффект фокусировки звука линзами, впервые продемонстрированный еще в середине XIX века^(3,4), затем повторялся (см., например⁽⁵⁾), количественные исследования до сих пор не проводились. Попытки экспериментального измерения коэффициента усиления звуковых линз⁽⁶⁾ из-за несовершенства измерительной методики дали лишь качественные результаты. В данной заметке описаны некоторые результаты экспериментального исследования линз, принятого с целью заполнить этот пробел.

2. Измерения проводились с фокусирующими линзами, в воде, прикрепленными в горизонтальном положении к раме механизма, обеспечивающего перемещение в трех координатах щупа для исследования фокальной области линзы с точностью перемещения и отсчета порядка $1/20$ длины наименьшей звуковой волны. Были приняты необходимые меры для полного устранения отражений от дна и боковых поверхностей и уменьшения регулярного отражения от свободной поверхности воды путем модуляции частоты и взбалтывания поверхности. Опытным путем было установлено, что имевшие место помехи из-за отражения от поверхности воды не влияли на стабильность звукового давления в фокусе, вызывая лишь появление временных флуктуаций в свободном звуковом поле. В качестве щупа применялся пьезоэлектрический гидрофон, с размерами кристалла порядка $0,1-0,2 \lambda$. Напряжение, развиваемое кристаллом, усиливалось, преобразовывалось в напряжение звуковой частоты и подавалось на автоматический регистратор, записывающий изменение амплитуды колебания в линейном либо логарифмическом масштабе. Последний оказался удобнее, так как позволял измерять с достаточной степенью точности как первый, так и последующие максимумы диффракционной картины

фокуса. Перемещение ленты автоматического регистратора при измерениях распределения звукового давления в пространстве синхронизировалось с перемещением шупа по одной из трех координат. При измерении коэффициента усиления линзы для усреднения во времени звукового давления вне фокуса линзы шуп стоял на месте, тогда как лента перемещалась с постоянной скоростью. Звуковое поле создавалось пьезоэлектрическим излучателем, питаемым стабилизированным генератором. По всей площади линзы звуковое поле было достаточно равномерным.

Помимо измерений звукового давления производилось также исследование фазовой картины поля линзы и измерялась скорость распространения ультразвуковых волн в воде и материале линзы.

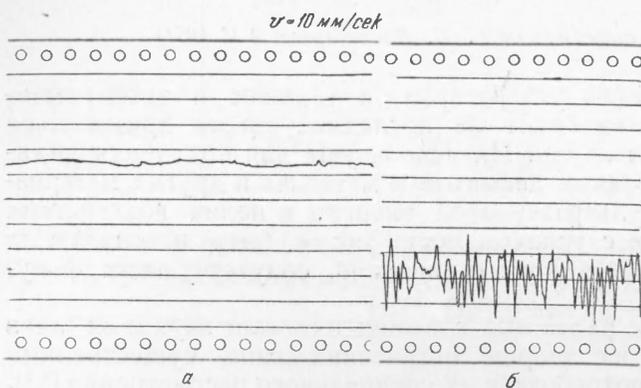


Рис. 1

линзы из металлов, силикатных материалов, дерева и пластмасс. Ниже приводятся результаты, полученные с мраморной линзой и двумя плексигласовыми линзами*. Мраморная линза и одна из плексигласовых были сделаны плоско-вогнутыми, другая плексигласовая линза имела оптимальную форму кривизны, соответствующую минимальной продольной сферической аберрации⁽²⁾. Отношение диаметра линзы к длине волны в жидкости изменялось в опытах от 25 до 250. Ошибки при изготовлении плоских и сферических поверхностей линзы для средней длины волны составляли примерно $0,1\lambda$ для мраморной линзы и $0,05\lambda$ для плексигласовых. Тангенс угла раскрытия линз измерялся в пределах от 0,25 до 0,55.

4. На рис. 1 показана одна из записей коэффициента усиления плоско-вогнутой плексигласовой линзы в логарифмическом масштабе. Отрезок *a* соответствует положению шупа в фокусе линзы; отрезок *б* — сбоку от линзы в свободном поле. Масштаб по вертикали логарифмический — 5 децибел на одно деление. Обращает на себя внимание стабильность звукового давления в фокусе, тогда как неравномерность в свободном поле составляет около 10 дб. Это является результатом того, что в фокусе помехи из-за отражения от поверхности воды накладываются на усиленный прямой звук и потому не сказываются, тогда как в свободном поле они изменяют звуковое давление в отношении $(1 + \alpha)/(1 - \alpha)$, где α — коэффициент регулярного отражения от поверхности воды. При определении коэффициента усиления линзы за звуковое давление в свободном поле принималось среднее звуковое давление, соответствующее прямому звуку. Коэффициент

3. В связи с преимуществом звуковых линз с относительным показателем преломления $n < 1$ перед линзами, характеризующимися $n > 1$ ⁽²⁾, исследованию подвергались только твердые звуковые линзы ($n < 1$) как более целесообразные и в то же время удобные в изготовлении и эксплуатации. Были сделаны и измерены

* Плексигласовые линзы были изготовлены и исследованы в 1947—1948 гг. после того, как наши измерения скорости распространения продольных волн в плексигласе (1946 г.) показали его пригодность для этой цели.

усиления в данном случае равен 22 дБ. Средний коэффициент усиления по 5 измерениям дает величину 22,8 дБ, или 13,8 по давлению. Расчет коэффициента усиления по общеизвестной формуле параксиальной оптики дает $K_a = 20,8$. При этом допускается, что потери из-за отражений от границы линзы и воды отсутствуют. Если учесть эти потери, умножив коэффициент усиления „идеальной“ линзы на квадрат коэффициента прозрачности границы линзы и воды (по давлению), вычисленного для нормального падения лучей на границу ($D^2 = 0,85$), то получим значение $K_p = 17,7$, неплохо согласующееся с экспериментальным значением. Неполное совпадение объясняется тем, что в расчете не учитываются волновая aberrация линз, непостоянство амплитуды по фронту сходящейся волны из-за зависимости коэффициента прозрачности границы от угла падения, а также возникновение поперечных волн, многократные внутренние отражения и затухание в линзах. Существенно и то, что расчет относится к параксиальным линзам, тогда как в действительности линзы имеют довольно большой угол раскрытия.

5. На рис. 2 приведены записи распределения звукового давления в фокальной поверхности линзы: запись *a* — в логарифмическом масштабе

по вертикальной оси относится к плексигласовой плоско-вогнутой линзе; запись *б* — в том же масштабе, но растянутая по горизонтальной оси, показывает распределение в фокальной поверхности двояковогнутой плексигласовой линзы; здесь наряду с основным максимумом отчетливо записаны первые и даже вторичные побочные максимумы. Запись в линейном масштабе (рис. 2, *в* — мраморная линза) хотя и демонстрирует эффект фокусировки звука более наглядно, не дает возможности детально изучить дифракционную структуру фокуса. Экспериментальные значения для трех измерений плексигласовой плоско-вогнутой линзы сопоставлены с кривой распределения в фокусе, рассчитанной по формуле фраунгоферовой теории дифракции от круглого отверстия (рис. 2, *г*: $D/F = 0,89$, $D/\lambda = 52$). Здесь по горизонтальной оси отложен безразмерный параметр Z , по вертикальной оси — отношение давлений вне оси к давлению в центре фокуса. Неполное совпадение экспериментальных точек с расчетной кривой (на 3–5%) следует, по видимому, объяснить теми же причинами, которые приводились выше по отношению к коэффициенту усиления.

Наряду с распределением звукового давления на фокальной поверхности было исследовано распределение давления в близких к ней параллельных плоскостях, что дало возможность оценить совместное

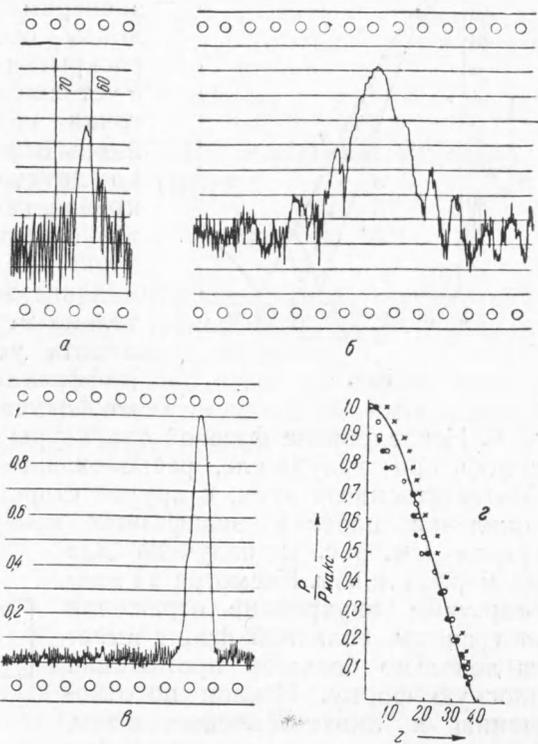


Рис. 2

действие дифракции и сферической aberrации, тогда как теоретический расчет в таких случаях связан, как известно, с проведением громоздких вычислений.

На рис. 3 приведены результаты сопоставления экспериментальных значений давления вдоль главной оси, полученных для плоско-вогнутой плексигласовой линзы, с теоретическими ($D/F = 0,79$, $D/\lambda = 55$). Кривая *a* рассчитана по формуле Дебая, справедливой для линз с конечным углом раскрытия (⁷) и при малом удалении от фокуса. Более крутой спад экспериментальных точек в направлении линзы объясняется увеличением угла раскрытия при приближении к линзе. Учет изменения расстояний от линзы до точки наблюдения при ее смещении вдоль оси (⁸) дает кривую *б*, лежащую по другую сторону экспериментальной кривой, несколько ближе к ней. Вообще же отметим, что звуковые линзы с не очень большим отношением диаметра к длине волны характеризуются сравнительно медленным изменением коэффициента усиления, а также и диаметра дифракционного кружка при смещении от фокуса на главной оси.

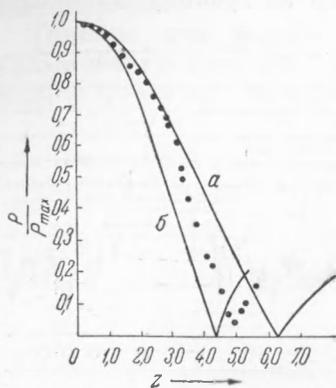


Рис. 3

6. Исследование фазовой структуры поля звуковой линзы производилось при излучателе, расположенном в главном фокусе линзы. Соответственно с этим, с другой стороны линзы следовало ожидать появления плоских эквифазных поверхностей. Экспериментальная кривая (см. рис. 4) получена для мраморной линзы. Несмотря на многократные внутренние отражения от границы, волновой фронт имеет на довольно большом протяжении плоскую форму. Наклон по отношению к линзе объясняется тем, что во время опыта излучатель был не в главном фокусе и его излучение было неполностью симметричным.

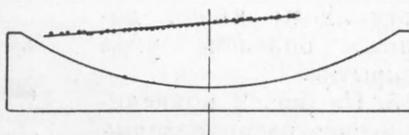


Рис. 4

Полученные результаты показывают возможность применения звуковых линз в качестве приставок к излучателям для создания плоских звуковых полей на большей поверхности волнового фронта, а также для получения сходящихся и расходящихся звуковых полей. Проведенные экспериментальные исследования показали хорошие фокусирующие свойства звуковых линз из твердых материалов.

Автор приносит благодарность проф. Л. Д. Розенбергу за ценные указания при проведении этой работы и М. Г. Сиротюку за помощь в измерениях.

Поступило
20 IV 1951

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ Л. Д. Розенберг, Звуковые фокусирующие системы, изд. АН СССР, М., 1949.
² Б. Д. Тартаковский, ДАН, **69**, 29 (1949). ³ С. Sonhauss, Poggend. Ann., **85**, 378 (1852). ⁴ Н. А. Гезехус, ЖРФХО, **22**, 233 (1890). ⁵ G. W. Willard, Bell. Lab. Rec., **25**, 194 (1947). ⁶ D. Sette, Journ. Ac. Soc. Am., **21**, 375 (1949). ⁷ P. Debye, Ann. d. Phys., **30**, 755 (1909). ⁸ А. И. Губанов, ЖТФ, **19**, 30 (1949).