

Каневский И.Н.

**Фокусирование звуковых и
ультразвуковых волн**

**Москва
«Книга по Требованию»**

УДК 53
ББК 22.3
К19

К19 **Каневский И.Н.**
Фокусирование звуковых и ультразвуковых волн / Каневский И.Н. – М.:
Книга по Требованию, 2012. – 336 с.

ISBN 978-5-458-35964-1

ISBN 978-5-458-35964-1

© Издание на русском языке, оформление
«YOYO Media», 2012

© Издание на русском языке, оцифровка,
«Книга по Требованию», 2012

Эта книга является репринтом оригинала, который мы создали специально для Вас, используя запатентованные технологии производства репринтных книг и печати по требованию.

Сначала мы отсканировали каждую страницу оригинала этой редкой книги на профессиональном оборудовании. Затем с помощью специально разработанных программ мы произвели очистку изображения от пятен, клякс, перегибов и попытались отбелить и выровнять каждую страницу книги. К сожалению, некоторые страницы нельзя вернуть в изначальное состояние, и если их было трудно читать в оригинале, то даже при цифровой реставрации их невозможно улучшить.

Разумеется, автоматизированная программная обработка репринтных книг – не самое лучшее решение для восстановления текста в его первозданном виде, однако, наша цель – вернуть читателю точную копию книги, которой может быть несколько веков.

Поэтому мы предупреждаем о возможных погрешностях восстановленного репринтного издания. В издании могут отсутствовать одна или несколько страниц текста, могут встретиться невыводимые пятна и кляксы, надписи на полях или подчеркивания в тексте, нечитаемые фрагменты текста или загибы страниц. Покупать или не покупать подобные издания – решать Вам, мы же делаем все возможное, чтобы редкие и ценные книги, еще недавно утраченные и несправедливо забытые, вновь стали доступными для всех читателей.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Фокусирование упругих волн в настоящее время широко применяется в решении многих научных и технических задач. Почти ежегодно в периодической печати публикуются новые разработки фокусирующих устройств для звукового, ультразвукового и гиперзвукового диапазонов частот. Несмотря на это, теория фокусирующих устройств отстает от практики. Достаточно сказать, что для вычисления полей любой из фокусирующих систем необходимо знать интеграл Дебая с индивидуальной функцией распределения, т. е. для каждой системы надо решать заново сложную дифракционную задачу. Поэтому одной из основных целей настоящей монографии являлось изложение обобщенного метода Дебая (часть I), позволяющего в значительной степени стандартизировать вычисление дифракционных интегралов — по крайней мере для систем с не слишком большими углами раскрытия (меньшими одного радиана) или с углами раскрытия 90° . Ограничения такими углами вполне достаточны для выяснения строения поля в фокальной области фокусирующей системы.

Указанному обобщению в гл. 1 предпосланы краткое изложение дифракционных интегралов Кирхгофа, Рэлея и Дебая; выяснение условий, которым могут удовлетворять функции распределения амплитуды на сходящемся волновом фронте; предложение рациональных — с точки зрения простоты вычислений — методов аппроксимации функций распределения. В гл. 2 описаны простые и эффективные методы вычисления полей в параксиальной области, когда заданы поля либо на акустической оси, либо на излучающей осесимметричной поверхности.

В гл. 3 вычисляются различными методами поля сходящихся цилиндрических и сферических волновых фронтов, находятся компоненты колебательной скорости, ис-

следуется структура поля в окрестности фокуса. Глава завершается обобщением формул Дебая, о котором говорилось выше. На основании этого обобщения в гл. 4 исследуются коэффициенты усиления и факторы фокусировки волновых фронтов, вводится понятие эффективного угла раскрытия волнового фронта, позволяющее связать воедино различные параметры сходящегося фронта и существенно упростить исследование фокусирующих систем.

В гл. 5 исследовано влияние фазовой аберрации и поглощения на поле в фокальной области; в гл. 6 вычислены средние звуковые давления на препятствии в фокусе и в рассеянной волне. Первое играет существенную роль в гидролокации, второе — в дефектоскопии. Гл. 7 посвящена рассмотрению энергетических характеристик сходящихся фронтов — потока энергии, импульса, технологической производительности и индекса производительности.

Восьмой главой начинается вторая часть монографии («Фокусирующие системы»). В этой части изложены методы исследования систем, а также отдельные элементы фокусирующих систем и их расчет: гл. 8 — линзы, гл. 9 — рефлекторы, гл. 10 — концентраторы. Следует отметить, что основное внимание уделяется принципиальной, акустической стороне дела, тогда как оптическая часть умышленно опущена. Например, описав конструкцию и методы расчета основных видов звуковых линз и показав, что они обладают значительной аберрацией, мы ничего не говорим о методах ее устранения; они известны в оптике.

В гл. 11 приведены разнообразные примеры применения фокусирующих устройств: в научном эксперименте, в дефектоскопии, в технологии, в медицине — хирургии и диагностике. По замыслу автора эта короткая глава должна служить иллюстрацией широты применения фокусирования упругих волн.

Автор

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время звуковые и ультразвуковые фокусирующие системы находят широкое применение, причем в области практического использования наметилось несколько направлений.

К первому направлению можно отнести применение фокусирующих устройств *для концентрации энергии* упругих волн с целью воздействия на вещество, например для проведения технологических процессов (эмульгирование жидкостей, диспергирование твердых тел и т. п.) или интенсификации этих процессов (экстрагирование, коагуляция гидро- и аэрозолей, сушка, получение порошков при электролизе и т. п.). К этому же направлению следует отнести применение концентраторов ультразвуковой энергии для воздействия на биологические объекты, например на клеточные ткани, в том числе применение концентраторов в медицине, например в нейрохирургии (при болезни Меньера, опухолях и в других случаях), в офтальмологии (при лечении некоторых глазных болезней), в ультразвуковой терапии и т. д.

Ко второму направлению можно отнести применение ультразвуковых фокусирующих систем в устройствах *для получения изображения* объектов, находящихся в жидких или твердых непрозрачных средах. Такие устройства нашли применение в дефектоскопии твердых тел, в медицинской диагностике (в частности, в кардиологии), в приборах для визуализации объектов в водоемах с мутной средой и т. п. Развитие ультразвуковой «оптики» было в значительной степени инициировано разработкой электронно-акустических преобразователей (ЭАП), позволяющих получать формируемое ультразвуковыми волнами изображение непосредственно на экране электроннолучевой трубки. Ультразвуковые объективы применяются также для получения изображений другими методами — фотодиффузионным (непосредственно

на фотобумаге), методом Польшмана (в объеме жидкости со взвешенными частицами) и т. д. Новым стимулом для дальнейшего совершенствования звуковой «оптики», несомненно, послужит акустическая голография, развивающаяся сейчас быстрыми темпами как за рубежом, так и в нашей стране.

К третьему направлению можно отнести применение звуковых фокусирующих систем *для формирования диаграмм направленности* электроакустических преобразователей с целью локации объектов, например, в гидролокации, рыболокации, в звуколокаторах для слепых, в эхо-офтальмоскопах и им подобных аппаратах для обнаружения посторонних предметов в тканях и органах и т. д. К этому же направлению можно отнести применение фокусирующих систем в устройствах звукофикации в виде приставок к динамическим громкоговорителям. В этих устройствах фокусирующие системы служат для создания акустических полей заданной конфигурации, например для концентрации звуковой энергии в заданном направлении, для рассеивания энергии с целью равномерного озвучивания и т. п.

Перечисленные направления объединяет общность физических явлений, протекающих при фокусировании упругих волн.

Фокусирование упругих волн, в общих чертах, сходно с фокусированием световых волн: в обоих случаях фокусирование осуществляется преобразованием волновых фронтов при помощи устройств, изменяющих направление распространения волны и длину волнового пути. Однако, наряду с общностью, между фокусированием упругих и световых волн имеются существенные различия. В оптике, как правило, имеют дело с некогерентными волнами, длина которых составляет ничтожную долю (стотысячную или миллионную) линейных размеров фокусирующего устройства; в акустике волны всегда когерентны и обычно их длина лишь в несколько раз меньше линейных размеров фокусирующего устройства. Поэтому при фокусировании в акустике существенное влияние оказывают интерференционные явления, роль которых в оптике незначительна.

Имеется существенное различие между импедансами материалов фокусирующих устройств в оптике (для

лектромагнитных волн) и в акустике (для упругих волн); в последнем случае импеданс может изменяться в столь широких пределах, что без учета этого явления рассчитать акустическую фокусирующую систему практически невозможно.

Показатели преломления материалов в оптике всегда больше единицы, тогда как в акустике они могут быть больше и меньше единицы. Это открывает возможность создания акустических собирающих линз как с выпуклыми, так и с вогнутыми поверхностями, а также дополнительную возможность (по сравнению с оптикой) корректирования фазовой аберрации.

Фокусирование упругих волн твердыми рефракторами осложняется частичным преобразованием продольных волн в поперечные, вследствие чего возникают два фокуса на оси системы. Это явление не наблюдается в оптике.

Если при расчете оптических фокусирующих систем, как правило, можно использовать методы геометрической оптики, то при расчете акустических систем в подавляющем большинстве случаев необходимо учитывать дифракционные явления; «геометрическая акустика» (в таком же понимании, как геометрическая оптика) имеет весьма ограниченную область применения.

Перечисленные основные различия между фокусированием оптических и звуковых волн не позволяют перенести оптические методы и расчеты на акустические системы и вызывают необходимость разработки специальных методов проектирования фокусирующих устройств для упругих волн.

Несмотря на то, что эффекты фокусирования звуковых волн при отражении от вогнутых поверхностей были известны много веков назад и описывались еще в XVII веке (Кирхнер, 1673), а первые опыты с собирающими звуковыми линзами и зональной пластинкой были проведены в середине и конце XIX века (Зондхауз, 1852; Хаех, 1856; Гезехус, 1886; Рэлей, 1888), регулярные исследования начали проводиться только в начале XX века, когда появились источники звуковых и ультразвуковых волн и были разработаны сравнительно простые и надежные методы их регистрации (Леонтьев, 1925; Хопвуд, 1929; Обата и Иосида, 1930; Гройцмахер,

1935; Без-Бардили, 1935). Первые теоретические исследования звуковых рефлекторов с использованием теории дифракции были проведены во Франции Рокаром (1932) и в СССР Гутиным (1935). Исследованием фокусирования упругих волн занимались в нашей стране и за рубежом многие ученые.

В 1949 г. вышла книга Л. Д. Розенберга «Звуковые фокусирующие системы», подводящая итог исследований фокусирования упругих волн различными авторами и обобщающая результаты теоретических и экспериментальных работ в этой области.

В связи с бурным развитием акустики, в частности ультразвуковой техники, за прошедшие два десятилетия после выхода книги Л. Д. Розенберга (1950—1970 гг.) появилось большое количество работ по фокусированию упругих волн. К ним следует прежде всего отнести фундаментальные работы Л. Д. Розенберга, в том числе «Фокусирующие излучатели ультразвука» (раздел монографии «Источники мощного ультразвука», «Наука», М., 1967), опубликованные в 1950—1967 гг., и основополагающие исследования методов расчета и измерения параметров акустических фокусирующих устройств Б. Д. Тартаковского, опубликованные в 1951—1963 гг. Благодаря работам Розенберга и Тартаковского в нашей стране вопросы фокусирования звуковых и ультразвуковых волн получили дальнейшее развитие в трудах многих исследователей.

Несмотря на обилие публикаций по фокусированию звуковых и ультразвуковых волн, по этой теме отсутствуют не только монографии, но даже достаточно полные обзоры. Назрела необходимость обобщить результаты работ по фокусированию упругих волн и изложить с единой точки зрения теорию фокусирования этих волн. Это позволит исследователям и разработчикам звуковых и ультразвуковых фокусирующих устройств легко ориентироваться в новых достижениях в области фокусирования упругих волн и использовать в своих работах результаты, достигнутые в смежных областях звуковой и ультразвуковой техники.

Обобщение результатов по фокусированию упругих волн представит интерес для специалистов не только в области акустики и ультразвуковой техники, но и в

других областях: в теории дифракции, в проектировании направленных антенн, конструировании оптических приборов и др.

В связи с быстрым развитием фокусирования упругих волн и многогранным применением фокусировки автор не ставил своей целью дать полный обзор достижений в этой области. Основное внимание в предлагаемой монографии уделяется единому подходу к расчету и проектированию фокусирующих устройств, а из области практического применения фокусировки упругих волн выбраны отдельные, но совершенно различные примеры, позволяющие судить о широте применения фокусировки: модуляция луча лазера, плавление веществ с помощью ультразвука при зонной очистке, усовершенствование промышленных дефектоскопов и медицинских офтальмоскопов с помощью ультразвуковых фокусирующих систем, использование фокусировки упругих волн для выяснения механизма фотодиффузии, применение фокусировки для создания ультразвукового фонтана при распылении жидкостей и для предотвращения фонтанирования и распыления жидкости при электролизе и т. д. Даже этот перечень некоторых из приведенных в монографии примеров применения звуковых фокусирующих систем характеризует широкие возможности практического их использования.

ЧАСТЬ I

ТЕОРИЯ ФОКУСИРОВАНИЯ ЗВУКОВЫХ ВОЛН

ГЛАВА I

ИНТЕГРАЛЬНЫЕ ВЫРАЖЕНИЯ ДЛЯ ПОТЕНЦИАЛА КОЛЕБАТЕЛЬНОЙ СКОРОСТИ

При исследовании полей акустических излучателей широко применяется достаточно хорошо разработанный математический аппарат, развитый в трудах Френеля, Фраунгофера, Кирхгофа, Грина, Рэлея, Дебая и других исследователей. Рассмотрим этот аппарат применительно к нашей задаче — вычислению полей фокусирующих систем. При описании методов расчета будут отмечены ограничения и трудности в применении математических формул, основанных на выводе строгой теории.

§ 1.1. Формула Грина

1.1.1. Точные выражения формулы Грина. При исследовании акустических полей, как и во всей теории дифракции, большую роль играет формула Грина, имеющая следующий вид:

для трехмерного случая

$$\Phi(M) = \frac{1}{4\pi} \int_{\Sigma} \left[\left(\frac{\partial \Phi}{\partial n} \right)_{\Sigma} \frac{h(-kR)}{R} - \Phi_{\Sigma} \frac{\partial}{\partial n} \frac{h(-kR)}{R} \right] d\Sigma, \quad (1)$$

для двумерного случая

$$\Phi(M) = \frac{i}{4} \int_{\Sigma} \left[\left(\frac{\partial \Phi}{\partial n} \right)_{\Sigma} H_0^{(2)}(kR) - \Phi_{\Sigma} \frac{\partial}{\partial n} H_0^{(2)}(kR) \right] d\Sigma. \quad (2)$$

Здесь $h(-kR) = \exp(-ikR)$ — функция-винт, введен-

ная Маршалем и Франсоном, $H_0^{(2)}(kR)$ — функция Ханкеля нулевого порядка, второго рода. Предполагается, что зависимость от времени τ имеет вид $\exp(-i2\pi\nu\tau) = h(-2\pi\nu\tau)$, где ν — частота.

Формулы (1) и (2) позволяют вычислить потенциал в любой точке области, ограниченной замкнутой поверхностью Σ , если заданы значения потенциала Φ_{Σ} и его нормальной производной $(\partial\Phi/\partial n)_{\Sigma}$ на границе области. В прямоугольной системе координат

$$R = [(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + (z-z_0)^2]^{1/2}, \quad (3)$$

где x, y, z — текущие координаты излучающей поверхности, x_0, y_0, z_0 — координаты точки наблюдения. В сферической или цилиндрической системе координат

$$R = [f^2 + r_0^2 - 2fr_0 \cos \gamma]^{1/2}, \quad (4)$$

где r_0 и f — расстояния от начала координат до точки наблюдения и излучающей поверхности соответственно, γ — угол между r_0 и f , причем в трехмерном случае

$$\cos \gamma = \sin \theta \sin \theta_0 \cos (\varphi - \varphi_0) + \cos \theta \cos \theta_0, \quad (5)$$

а в двумерном

$$\cos \gamma = \cos (\alpha - \alpha_0); \quad (6)$$

(θ_0, φ_0) и (θ, φ) — широтный и меридиональный углы радиусов r_0 и f — соответственно, α_0 и α — углы тех же радиусов в цилиндрическом случае.

При рассмотрении акустических задач под величиной Φ обычно понимают потенциал колебательной скорости v , удовлетворяющий соотношению

$$v = \text{grad } \Phi = i \frac{\partial \Phi}{\partial x} + j \frac{\partial \Phi}{\partial y} + k \frac{\partial \Phi}{\partial z}, \quad (7)$$

где i, j, k — единичные векторы в направлениях осей x, y, z [1]. В этом случае звуковое давление

$$p = -\rho_0 \frac{\partial \Phi}{\partial t} = ik\rho_0 c\Phi, \quad (8)$$

где ρ_0 — равновесная плотность среды, т. е. плотность

среды, когда волновое возмущение отсутствует. Из (7) следует, что

$$v_z = (\partial\Phi/\partial n)_z \quad (9)$$

— нормальная составляющая колебательной скорости на поверхности Σ , а из (8) видно, что

$$\Phi_z = -ip_z/2\pi\nu\rho_0 = -ip_z/k\rho_0c, \quad (10)$$

т. е. пропорционально звуковому давлению p_z на поверхности Σ . Следовательно, интеграл Кирхгофа выражает потенциал поля внутри области, ограниченной поверхностью Σ , через значения колебательной скорости точечных источников и давления, развиваемого диполями, на границе области.

Чтобы вычислить потенциал при помощи формулы (1) или (2), необходимо на поверхности Σ задать нормальную составляющую скорости и давление. Последние величины однозначно связаны между собой, и поэтому их нельзя задавать независимо. В этом случае часто прибегают к следующему упрощению: если длина волны λ в среде мала по сравнению с радиусами кривизны f излучающей поверхности Σ , то отдельные небольшие участки поверхности Σ , малые по сравнению с f и большие по сравнению с λ , рассматривают как плоские и полагают, что $p/v = \rho c$, как в плоском случае. Вычисляя нормальные производные, из (1) и (2) получим

$$\begin{aligned} \Phi_c = -\frac{1}{4\pi} \int_{\Sigma} v_z \left\{ \frac{h(-kR)}{R} [1 + \cos(n, \hat{R})] - \right. \\ \left. - i \frac{h(-kR)}{kR^2} \cos(n, \hat{R}) \right\} d\Sigma, \end{aligned}$$

$$\Phi_u = -\frac{i}{4} \int_{\Sigma} v_z [H_0^{(2)}(kR) + iH_1^{(2)}(kR) \cos(n, \hat{R})] d\Sigma.$$

1.1.2. Приближенные выражения формулы Грина. Рассмотрим поля на больших расстояниях от излучающих поверхностей, когда $kR \gg 1$. В этом случае пренебрежем вторым слагаемым в выражении для Φ_c , а в