

*Памяти
Людмилы Ивановны Ратниковой
посвящаем*

ВВЕДЕНИЕ

Существует множество великолепных монографий, в которых подробно и глубоко описываются теоретические основы сейсмической разведки и сейсмологии. Среди книг, многие годы влиявших на подготовку сейсмологов, можно упомянуть следующие: К. Аки и П. Ричардс “Количественная сейсмология”; Л.М. Бреховских “Волны в слоистых средах”; К. Буллен “Введение в теоретическую сейсмологию”; Х. Кольский “Волны напряжения в твердых телах”; W.M. Ewing, W.S. Jardetsky, F. Press “Elastic Waves in Layered Media”; F.S. Grant, G.F. West “Interpretation Theory in Applied Geophysics”; J.E. White “Seismic Waves”.

Однако практически во всех этих книгах с самого начала предполагается, что читатели обладают достаточно сильной подготовкой в некоторых областях физики, математики и математической физики. К сожалению, это не всегда так. Поэтому, чтобы заполнить существующий пробел, мы попытались дать описание основных физических принципов распространения акустических и сейсмических волн. Другими словами, мы рассматриваем только так называемые “прямые задачи” распространения волн в жидких и упругих средах. За пределами данной книги остались “обратные задачи” определения свойств среды по наблюдениям волнового поля, а также вычислительные аспекты решения “прямых задач”. Мы надеемся, что наша книга будет полезна читателям для понимания более сложных вопросов, рассматриваемых в других книгах.

Для удобства читателя материал располагается по принципу “от простого к сложному”. Последовательные части монографии органично связаны между собой. И мы надеемся, что преимущества такого расположения материала очевидны. Этот традиционный подход широко используется и в других областях геофизики. Один из авторов книги (А.А. Кауфман) придерживался именно такого способа изложения в своей монографии “Введение в теорию геофизических методов”, где приводятся описания гравитационных, электрических и электромагнитных полей, используемых в геофизике.

Опишем кратко содержание данной книги. Первая глава посвящена законам Ньютона, которые вместе с законом Гука управляют поведением акустических и упругих волн. В этой главе мы напоминаем читателю о таких основных понятиях, как сила, работа, энергия, количество движения, импульс силы и центр масс. Все они используются при выводе уравнений, описыва-

ющих волновые явления. С этой же целью в главу помещено несколько примеров. Например, мы иллюстрируем механизм распространения волн через газ и описываем эллиптическую поляризацию, которая типична для большинства волн.

Распространение волн в любой среде сопровождается движением (колебаниями) и деформацией элементарных объемов. Каждый из этих элементов можно мысленно заменить системой, состоящей из масс и пружин. Движение такой системы описывается во второй главе. Сначала мы вводим закон Гука в его простейшей, скалярной форме, т.е. когда сила и смещение имеют либо одинаковые, либо противоположные направления.

Особое внимание уделяется свободным и вынужденным колебаниям, происходящим во время распространения волны. С помощью законов Ньютона и Гука выводятся уравнения колебаний. Существенно, что точно таким законам подчиняются и волновые явления.

Поскольку в реальности механическая энергия всегда преобразуется в тепло, в данной главе мы описываем явление затухания и вводим такие понятия, как декремент затухания, потери энергии и параметр Q . Помимо этого, здесь обсуждаются также принципы измерения смещений и ускорений частиц.

В третьей главе обсуждается совершенно другое явление, а именно, распространение движения. Чтобы подчеркнуть физические аспекты этого явления, мы выбрали модель, состоящую из последовательности масс и пружин, соединенных друг с другом. Такой подход не является новым и часто используется в литературе. Возможно, Ньютон был первым, кто применил эту модель для изучения акустических волн.

Используя эту модель, мы выводим волновое уравнение, описываем разницу между состоянием равновесия и динамическим состоянием и исследуем, как ведут себя смещение и сила в местах разрыва физических параметров. Кроме того, данная модель позволяет наглядно описать, как происходит отражение волн. В третьей главе мы обсуждаем также распространение поперечных (сдвиговых) волн вдоль бесконечной струны и вдоль струны конечной протяженности и, в частности, процесс возбуждения нормальных мод (стоячих волн).

В следующей главе, исходя из принципа сохранения массы, линейной связи между плотностью и давлением и из законов Ньютона, мы приходим к системе уравнений, описывающих волны сжатия (дилатации). Используя принцип неразрывности среды, мы формулируем также граничные условия, в том числе и вблизи источника.

Указанные уравнения используются для изучения поведения волн в различных средах. Поскольку существует бесконечное число решений этих уравнений, мы приводим теорему единственности для кусочно-однородной среды. В процессе обсуждения вводятся такие понятия, как плотность энергии волн сжатия, поток энергии и вектор Пойнтинга.

В эту главу мы включили также описание поверхностных (гравитационных) волн в несжимаемой жидкости. Это сделано по нескольким при-

чинам, главная из которых заключается в том, что эти волны во многом похожи на волны Рэлея и Стоули, существующие в упругой среде с границами раздела.

Следуя принципу “от простого к сложному”, в главе 5 мы изучаем поведение волн в однородной среде. Сферические, цилиндрические и плоские волны рассматриваются здесь как в частотной, так и во временной областях. Особое внимание уделяется их свойствам в ближней, промежуточной и дальней зонах.

В главе 6 описываются основные свойства интерференции волн. При этом используются относительно простые модели (экраны), не требующие сложных математических вычислений, однако позволяющие наглядно продемонстрировать картину дифракции. Хотя в оптике эти модели очень часто имеют большое практическое значение, здесь они используются только для иллюстрации явления дифракции. В процессе обсуждения математических и физических основ этого явления, мы приводим вывод формул Гельмгольца и Кирхгофа и подробно описываем принципы Френеля и Гюйгенса. Кроме того, в данной главе рассматриваются зоны Френеля, вторичные источники и интерференция волн, вызванных этими источниками, а также влияние длины волны и геометрических параметров.

Помимо этого, здесь обсуждается переход к высокочастотному приближению, т.е. к геометрической акустике. Для упрощения анализа, мы выполняем его двумя разными способами. Один из них основан на использовании экранов и требует только простейших геометрических преобразований. Другой способ заключается в разложении решения волнового уравнения в степенной ряд по частоте. Для иллюстрации данного способа приводится простой пример, в котором плоская волна бежит в среде, где скорость меняется только в направлении распространения этой волны.

В главе 7 описывается конструктивная и деструктивная интерференция волн с близкими частотами и волновыми числами. Анализ этого явления связан с такими понятиями, как волновая группа, групповая скорость и стационарная фаза. Все эти понятия важны для понимания распространения нестационарных диспергирующих волн.

Последняя, восьмая глава посвящена принципам геометрической акустики в неоднородных средах. Сначала, исходя из уравнения эйконала, мы демонстрируем справедливость принципа Ферма. Затем рассматриваем поведение лучей и волновых фронтов в среде, где скорость является непрерывной функцией. Особое внимание уделяется поведению лучей на поверхностях раздела сред. Поскольку уравнение эйконала на этих границах не имеет смысла, для вывода законов преломления и отражения Снеллиуса используются другие методы, основанные на принципе Ферма, принципе Гюйгенса и на решении граничной задачи для плоских волн. Большую часть этой главы занимает описание лучей отраженных, преломленных и головных волн в присутствии плоских границ раздела.

В конце этой книги мы поместили несколько приложений, в которых содержится необходимая информация об используемом здесь математичес-

ком аппарате. В них мы попытались описать в краткой форме смысл применяемых здесь элементов математики. Это особенно важно, когда речь идет о векторном анализе, поскольку такие понятия, как градиент, дивергенция, ротор и лапласиан играют основополагающую роль в теории акустических и упругих волн.

В этом введении мы хотим также вкратце описать содержание следующего тома монографии. Вначале мы продолжим обсуждение приближения геометрической акустики и рассмотрим акустические волны, распространяющиеся в слоисто-однородной среде. В следующих двух главах мы рассматриваем отражение и преломление плоской волны в горизонтально-слоистой среде. Следующая глава описывает поле сферического источника в присутствии одной плоской поверхности раздела. В пятой главе мы описываем распространение нормальных мод внутри слоя с пониженной скоростью. Последняя глава посвящена волнам внутри цилиндрического слоя.

БЛАГОДАРНОСТИ

Мы хотим поблагодарить Михаила Бармина, Норму Блейстайна, Владимира Гречку, Джона Десанто, Александра Каганского, Евгения Ланду, Кена Лэрнера, Льва Островского, Константина Наугольных и Татьяну Яновскую за полезные обсуждения. Мы также благодарны Матту Ханей за проверку приложений.

К РУССКОМУ ИЗДАНИЮ

Эта книга является продолжением двух монографий “Введение в теорию геофизических методов”, переводы которых вышли в издательстве “Недра” в 1997 и 2000 годах. Мы выражаем искреннюю благодарность Евро-Азиатскому геофизическому обществу и его президенту Н.А. Савостьянову за огромную помощь в подготовке этой книги. Мы также благодарны за финансовую поддержку Центру Шлюмберже в Москве (Директор Кристиан Бессон).

*Болдер, Колорадо, США.
Апрель 2001 г.*

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

| | |
|------------|--------------------------|
| a | ускорение |
| a_n, b_n | коэффициенты ряда Фурье |
| A_n, B_n | амплитуды нормальных мод |
| A_R | резльтирующая амплитуда |

| | |
|--------------------------------|---|
| c | фазовая скорость |
| c_a | кажущаяся скорость |
| c_g | групповая скорость |
| c_s | скорость поперечных волн |
| C | сжимаемость |
| C, S | функции Френеля |
| d | расстояние между источниками |
| dl | элементарное перемещение |
| dS | элемент площади |
| e_k | плотность кинетической энергии |
| e_p | плотность потенциальной энергии |
| e_{xx} | деформация |
| E | полная энергия |
| E_k | кинетическая энергия |
| E^* | параметр пружины |
| F | сила |
| g | гравитационное поле |
| G | функция Грина |
| h | ступенчатая функция |
| h' | производная ступенчатой функции |
| $H_0^{(1)}(mr), H_0^{(2)}(mr)$ | функции Ганкеля нулевого порядка |
| $i = \sqrt{-1}$ | мнимая единица |
| i | единичный вектор |
| I | среднее значение потока энергии |
| j | единичный вектор |
| $J_0(mr), Y_0(mr)$ | функции Бесселя |
| k | жесткость пружины, волновое число |
| k_r | волновые числа нормальных мод |
| K | кривизна |
| $K(\varphi)$ | коэффициент в формуле Френеля |
| l | длина пружины |
| L | путь |
| L, N | интегралы Френеля |
| L_1, L_2 | характеристические длины |
| m | масса, параметр диска |
| M | полная масса, модуль объемного сжатия |
| M | вектор |
| n | коэффициент преломления |
| n | единичная нормаль к поверхности |
| N | импульс силы, акустическая длина |
| p | точка наблюдения, корни характеристического уравнения |
| P | давление |
| P_a | избыточное давление |

| | |
|-------------------------|---|
| \mathbf{P} | количество движения (импульс) |
| Q | фактор, характеризующий затухание |
| r | расстояние от оси z |
| R | расстояние от начала координат |
| s | смещение |
| \mathbf{s}_0 | единичный вектор вдоль луча |
| S | эйконал |
| S_x, S_y, S_z | компоненты вектора Пойнтинга |
| t | время |
| T | период |
| T_b | период биений |
| T_0 | период свободных колебаний, растяжение струны |
| u, v | переменные интегрирования |
| U | акустический потенциал, потенциальная энергия |
| U_n | потенциал, связанный с зонами Френеля |
| \mathbf{v} | скорость |
| V_0 | элементарный объем |
| W | работа |
| $\Delta W/W$ | удельные потери |
| \mathbf{Y} | вектор Пойнтинга |
| X, Y, Z | компоненты силы |
| z | комплексное число |
| Z | импеданс |
| α, β, γ | направляющие косинусы |
| α | коэффициент в законе Кулона – Мора |
| α_* | логарифмический декремент |
| δ | дельта-функция |
| δ' | производная дельта-функции |
| γ | функция, характеризующая спектр |
| ε | малый параметр |
| Φ | комплексная амплитуда потенциала |
| φ | начальная фаза, акустический потенциал |
| λ | длина волны |
| θ | угол падения, дилатация |
| θ_r | угол отражения |
| θ_2 | угол преломления |
| θ_c | критический угол |
| ρ | объемная плотность |
| ρ_a | приращение плотности |
| Σ | поверхность |
| τ | постоянная времени, задержка по времени |
| ω | частота |
| ω_0 | частота свободных колебаний |