

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОТРАЖЕНИЯ УПРУГИХ ВОЛН ОТ ШЕРОХОВАТЫХ ГРАНИЦ

Юрий Иванович Колесников

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, доктор технических наук, доцент, главный научный сотрудник лаборатории динамических проблем сейсмологии, тел. (383)333-31-38, e-mail: KolesnikovYI@ipgg.sbras.ru; Сейсмологический филиал Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба РАН», 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, ведущий геофизик

Руслан Нуржанович Бейсембаев

Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2, магистрант; Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, e-mail: libyf@yandex.kz

На результатах физического моделирования показано, что влияние шероховатости границы на ее отражательную способность зависит от соотношения характерного размера шероховатости и длины волны. Шероховатость границ ведет к уменьшению эффективных коэффициентов отражения на докритических и к их возрастанию на закритических углах падения. Изменение азимута плоскости падения по отношению к направлению шероховатости заметно влияет на коэффициенты отражения только на закритических углах падения.

Ключевые слова: шероховатые границы, отражение упругих волн, физическое моделирование.

EXPERIMENTAL STUDY OF THE REFLECTION OF ELASTIC WAVES FROM ROUGH BOUNDARIES

Yury I. Kolesnikov

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 3, Prospect Akademik Koptyug St., Novosibirsk, 630090, Russia, D. Sc., Associate Professor, Chief Researcher of Laboratory of Seismic Dynamic Analysis, phone: (383)333-31-38, e-mail: KolesnikovYI@ipgg.sbras.ru; Seismological Branch of Federal Research Center «United Geophysical Survey RAS», 3, Prospect Akademik Koptyug, Novosibirsk, 630090, Russia, Lead Geophysicist

Ruslan N. Beysembaev

Novosibirsk National Research State University, 2, Pirogova St., Novosibirsk, 630073, Russia, Graduate; Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 3, Prospect Akademik Koptyug St., Novosibirsk, 630090, Russia, e-mail libyf@yandex.kz

The results of physical modeling show that the influence of boundary roughness on its reflectivity depends on the ratio of roughness characteristic dimension and wavelength. The boundary roughness leads to a decrease in the effective reflection coefficients at subcritical and to their increase at supercritical angles of incidence. A change in the azimuth of the plane of incidence with respect to the roughness direction appreciably affects the reflection coefficients only at supercritical angles.

Key words: rough boundaries, reflection of elastic waves, physical modeling.

Шероховатыми границами в сейсмике принято называть сейсмические границы, у которых радиус кривизны неровностей либо размер участка неоднородностей упругих свойств соизмеримы с длиной волны [1]. Волны, отраженные от таких границ, по сути, являются суперпозицией волн, дифрагированных на неоднородностях границы, вследствие чего коэффициенты отражения не могут быть описаны аналитически, за исключением отдельных случаев. Поэтому для выявления некоторых общих закономерностей отражения сейсмических волн от шероховатых границ эффективным инструментом могут оказаться экспериментальные методы.

В научной литературе имеются примеры экспериментальных исследований влияния шероховатости границ на отражение от них упругих волн. В частности, опубликован ряд работ, в которых изучался эффект обратного смещения ультразвукового пучка, отраженного от границы с периодическими неровностями [5–7, 9]. Известны также эксперименты по изучению отражения упругих волн от шероховатых границ для случая нормального падения [3, 8].

В то же время для некоторых сейсмических технологий, в частности, использующих различные модификации AVO-анализа, могут представлять интерес экспериментальные данные о том, как шероховатость границ влияет на эффективные (кажущиеся) коэффициенты отражения при наклонном падении. В данной работе на физических моделях исследовано отражение упругих волн при их наклонном падении на шероховатые границы, форма поверхности которых прямолинейна в одном и периодична во всех остальных азимутальных направлениях. В дальнейшем такую шероховатость будем называть линейной.

Эксперименты проводились на установке, которая ранее использовалась для моделирования отражения упругих волн от границ воды с поглощающими [2] и анизотропными [4] средами (рис. 1). В установке пьезокерамические источник и приемник ультразвуковых импульсов могут вращаться каждый на своем независимом рычаге фиксированной длины вокруг воображаемой оси, проходящей по верхней границе исследуемого образца. Таким образом, суммарная длина лучей падающей и отраженной от образца волн всегда остается неизменной, в данном случае она равна 135 мм. Это позволяет компенсировать влияние геометрического расхождения на динамические характеристики регистрируемых импульсов. Кроме того, в такой конструкции источник и приемник всегда ориентированы одинаково относительно лучей, соответственно, падающей и отраженной волн, что исключает влияние их диаграмм направленности на результаты измерений.

При преобладающей частоте датчиков (1,7 МГц) длина волны в воде составляет около 0,9 мм, так что расстояние от источника до отражающей поверхности превышает длину волны более чем в 70 раз. Это позволяет считать фронт падающей на границу волны квазиплоским и проводить сравнение экспериментальных коэффициентов отражения с теоретическими для плоских волн. Для экранирования прямой волны между датчиками помещалась тонкая пластина пенопласта. Вся конструкция вместе с образцом на время экспериментов помещалась в емкость с водой.



Рис. 1. Экспериментальная установка

При проведении экспериментов образец устанавливался так, чтобы его верхняя граница была горизонтальна, а рычаги с источником и приемником при каждом измерении фиксировались под одинаковыми углами симметрично относительно вертикальной плоскости, проходящей через ось их вращения. Таким образом, эти углы были равны углу падения на границу воды с образцом, а положение центров площадок отражения для всех углов падения было неизменным. В экспериментах угол падения изменялся в пределах от 10 до 80 градусов. Регистрация отраженных от шероховатых границ волн производилась под разными азимутальными углами – 0° (вдоль направления линейной шероховатости), 45° и 90° (поперек шероховатости).

Источник излучал упругие волны при подаче на него от генератора прямоугольных электрических импульсов амплитудой 60 вольт. Приемник преобразовывал отраженные от границы вода-образец упругие волны в электрические импульсы, которые регистрировались цифровым осциллографом и записывались в память компьютера для последующей обработки.

Кроме того, перед началом экспериментов была проведена регистрация прямой волны при убранном образце и раскрытии рычагов на 180° , то есть на том же расстоянии 135 мм, что и расстояние вдоль лучей прямой и отраженной волн при разных углах падения. При обработке оцифрованных данных по импульсам прямой (без образца) и отраженных при разных углах падения волн определялись их амплитуды, как разности первых двух экстремумов каждого сигнала.

Модули коэффициентов отражения для каждого угла падения рассчитывались как отношения амплитуд отраженной и прямой волн. Строго говоря, для шероховатых границ такие коэффициенты отражения правильнее называть эффективными или кажущимися, поскольку «отраженные» от шероховатых границ волны на самом деле являются результатом наложения множества волн, дифрагированных на неоднородностях границ. В дальнейшем будем иметь это в виду, используя, тем не менее, терминологию для гладких границ.

В качестве материала для образцов использовался плексиглас. Для последующего сравнения с результатами, полученными для шероховатых границ, предварительно был проведен эксперимент с гладкой (зеркальной) границей вода-плексиглас. Для этого случая также была рассчитана теоретическая зависимость модуля коэффициента отражения с учетом поглощающих свойств плексигласа, которая также использовалась для сравнения с экспериментальными результатами.

Образцы с линейно-шероховатыми границами изготавливались на фрезерном станке с ЧПУ (числовым программным управлением). Было подготовлено несколько образцов с шероховатыми поверхностями с треугольными профилями сечений (рис. 2). Характерные размеры шероховатостей (шаг между соседними «складками») варьировались от 0,25 мм до 2 мм, то есть отношение этих размеров к длине волны в воде менялось в пределах 0,28–2,2.

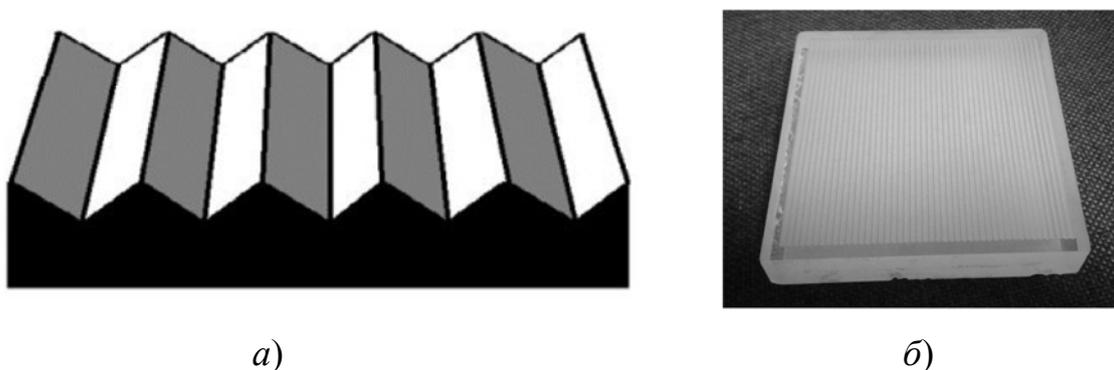


Рис. 2. Схематическое изображение шероховатой границы с треугольным профилем сечения (а) и общий вид одной из моделей (б)

Экспериментальные зависимости модулей коэффициентов отражения от угла падения для шероховатых границ с треугольным профилем сечения, а также от гладкой (зеркальной) границы вода-плексиглас в сравнении с теоретической зависимостью для гладкой границы этих материалов представлены на рис. 3. Результаты приведены для характерных размеров шероховатостей 0,25 мм, 0,5 мм и 1 мм. Отражения от границы с характерным размером 2 мм практически отсутствовали, поэтому график для этого случая не приводится.

По результатам экспериментов можно сделать следующие выводы. Характер и степень влияния шероховатости границы на ее отражательную способность зависят от соотношения длины волны и характерного размера шероховатости. В исследованных случаях шероховатость границ ведет, как правило, к уменьшению коэффициентов отражения на докритических углах падения и к их возрастанию на закритических углах по сравнению с зеркальной границей. На близких к критическим углах падения при малых характерных размерах шероховатости границы ее отражающая способность также может увеличиваться. В наших экспериментах это наблюдалось для характерного размера 0,25 мм, то есть при его отношении к длине волны порядка 0,28.

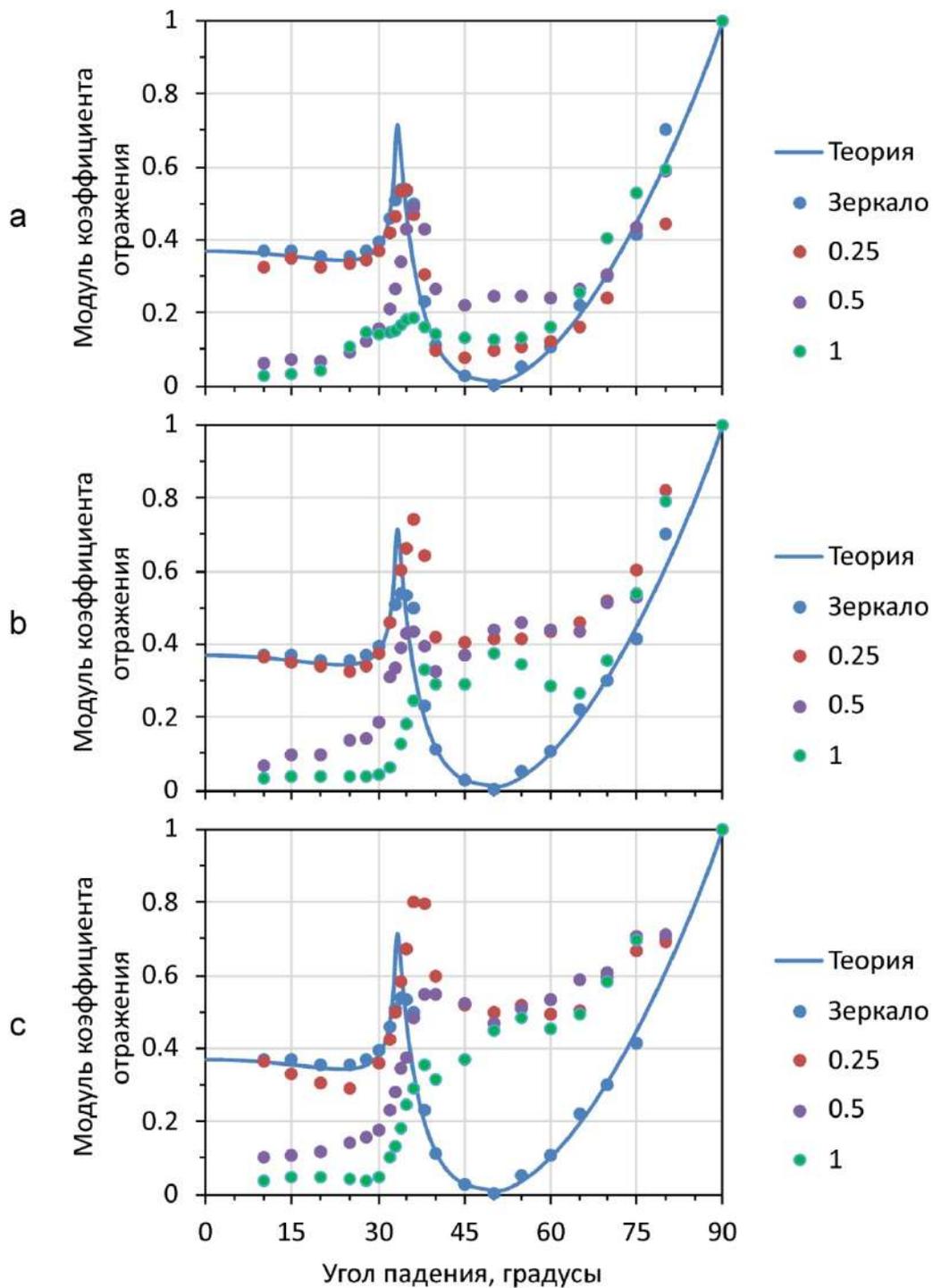


Рис. 3. Зависимости коэффициентов отражения от угла падения на границы с характерными размерами треугольной шероховатости 0,25 мм, 0,5 мм и 1 мм для азимутов 0° (a), 45° (b) и 90° (c)

При характерных размерах шероховатости больше длины волны отраженные волны практически не наблюдаются, за исключением больших (более 60°) углов падения. Изменение азимута плоскости падения по отношению к направ-

лению линейной шероховатости при ее фиксированном характерном размере слабо влияет на отражательную способность границы на докритических углах. На закритических углах увеличение азимута ведет к возрастанию коэффициентов отражения относительно коэффициентов для гладкой поверхности.

Работа выполнена при поддержке проекта ФНИ № 0331-2019-0009 «Динамический анализ сейсмических данных для построения реалистичных моделей геологической среды на основе математического и физического моделирования».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. ГОСТ 16821-91. Сейсморазведка. Термины и определения. – М.: Издательство стандартов, 1992. – 28 с.
2. Колесников Ю.И. Отражение ультразвуковых импульсов от границы воды с неидеально упругими средами: экспериментальные данные для случая наклонного падения // Физическая мезомеханика. – 2005. – Т. 8. – №1. – С. 91–97.
3. Ушаков Г.Д., Ушаков М.Г. Экспериментальное изучение рассеивания упругих волн на шероховатой границе раздела // Геология и геофизика. – 1993. – Т. 34. – №2. – С. 103–111.
4. Колесников Ю.И., Федин К.В., Орлов Ю.А. Физическое моделирование отражения упругих волн от азимутально-анизотропной среды // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XIV Междунар. науч. конгр: Междунар. науч. конф. «Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Экономика. Геоэкология»: сб. материалов в 6 т. (Новосибирск, 23–27 апреля 2018 г.). – Новосибирск: СГУГиТ, 2018. Т. 3. – С. 191-198.
5. Herbison S.W., Declercq N.F., Breazeale M.A. Angular and frequency spectral analysis of the ultrasonic backward beam displacement on a periodically grooved solid // The Journal of the Acoustical Society of America. – 2009. – Vol. 126. – №6. – P. 2939–2948.
6. Backward displacement of ultrasonic waves reflected from a periodically corrugated interface / A. Teklu, M.A. Breazeale, N.F. Declercq, R.D. Hasse, M.S. McPherson // Journal of Applied Physics. – 2005. – Vol. 97. – №8/084904. – P. 1–4.
7. Breazeale M.A., Torbett M.A. Backward displacement of waves reflected from an interface having superimposed periodicity // Applied Physics Letters. – 1976. – Vol. 29. – № 8. – P. 456–458.
8. Experimental study of inhomogeneous wave reflection from a solid-air periodically rough boundary using leaky Rayleigh waves / W. Huang, R. Briers, S.I. Rokhlin, O. Leroy // The Journal of the Acoustical Society of America. – 1994. – Vol. 96. – № 1. – P. 363–369.
9. Teklu A.A., Breazeale M.A. Backward displacement of ultrasonic waves reflected from a corrugated interface // The Journal of the Acoustical Society of America. – 2003. – Vol. 113. – Issue 4. – P. 2283.

© Ю. И. Колесников, Р. Н. Бейсембаев, 2019