

## ИССЛЕДОВАНИЕ ОТРАЖЕНИЯ УПРУГИХ ВОЛН ОТ ШЕРОХОВАТЫХ ГРАНИЦ (ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ)

*К.В. Федин<sup>1,2,3</sup>, Ю.И. Колесников<sup>1</sup>, Г.А. Дугаров<sup>1</sup>, Р.Н. Бейсембаев<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup> *Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН, 630090, Новосибирск, Пр. Коптюга, 3, fedinkv@ipgg.sbras.ru*

<sup>2</sup> *Новосибирский государственный университет, 630090, Новосибирск, 630090, ул. Пирогова, 2*

<sup>3</sup> *Новосибирский государственный технический университет, 630073, Новосибирск, проспект Карла Маркса, 20*

**Аннотация.** 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.*

## RESEARCH OF REFLECTION OF ELASTIC WAVES FROM ROUGH BORDERS (PHYSICAL MODELING)

*K.V. Fedin<sup>1,2,3</sup>, Yu.I. Kolesnikov<sup>1</sup>, G.A. Dugarov<sup>1</sup>, R. N. Beysembaev<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup> *Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Novosibirsk, pr. Koptuyga, 3*

<sup>2</sup> *Novosibirsk State University, 630090, Novosibirsk, st. Pirogova, 2*

<sup>3</sup> *Novosibirsk State Technical University, 630073, Novosibirsk, Karl Marx Avenue, 20*

**Abstract.** The results of physical modeling show that the effect of the roughness of the boundary on its reflectivity depends on the ratio of the characteristic roughness size and wavelength. The roughness of the boundaries leads to a decrease in the effective reflection coefficients at subcritical and to their increase at supercritical angles of incidence. Changing the azimuth of the plane of incidence with respect to the direction of roughness significantly affects the reflection coefficients only at supercritical angles of incidence.

**Keywords:** *rough borders, 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 [2–4, 5]. Известны также эксперименты по изучению отражения упругих волн от шероховатых границ для случая нормального падения [6, 7].

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. Здесь 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.

На практике зависимость коэффициентов отражения от азимута может быть использована для определения направления преимущественной ориентации трещин погруженных коллекторов, например, с помощью методов AVO-анализа, разрабатываемых для азимутально анизотропных сред [8–12]. Для отработки и надежной верификации таких методов должны привлекаться данные моделирования, в том числе физического.

Эксперименты проводились на установке, которая ранее использовалась для моделирования отражения упругих волн от границ воды с поглощающими [13] и анизотропными [14] 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.

Использовавшиеся для излучения и приема упругих волн пьезокерамические преобразователи имеют размеры порядка 1 см в диаметре и 2 см в длину. Конструкция преобразователей схематически показана на рис. 1. Преобладающие частоты преобразователей – порядка 1 МГц, они обладают высокой чувствительностью и помехозащищенностью.

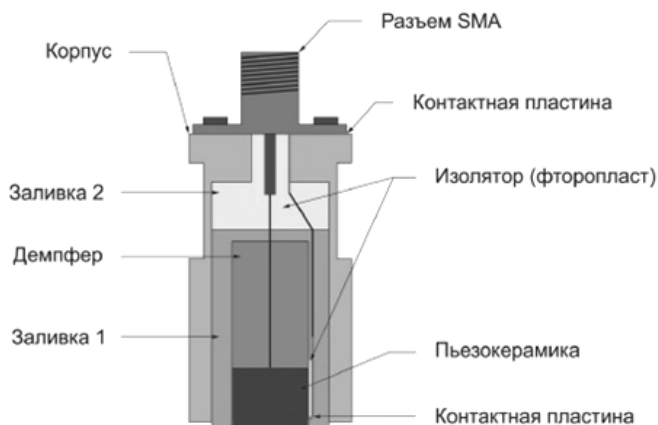


Рисунок 1. Конструкция пьезоэлектрического преобразователя.

Также для получения экспериментальных данных использовались генератор импульсов Г5-53, цифровой осциллограф В-423 и компьютер. Из программного обеспечения при регистрации использовались стандартные программы цифрового осциллографа. Последующая обработка экспериментальных данных проводилась с помощью программы, написанной в пакете Matlab и Excel.

### Описание экспериментальной установки

Для проведения экспериментов использовалось рычажное устройство [13], в котором источник и приемник ультразвуковых импульсов могли вращаться каждый на своем независимом рычаге фиксированной длины вокруг одной воображаемой оси, проходящей по плоской границе исследуемого образца (рис. 2).

Источник и приемник ультразвуковых импульсов были изготовлены на базе пьезокерамических дисков толщиной 1 мм и диаметром 6 мм (источник) и 10 мм (приемник). Расстояние оси вращения до источника 65 мм, а до приемника 70 мм.

Следовательно, путь, который пробегала волна, всегда оставался неизменным и был равен 135 мм. Это позволяло компенсировать влияние геометрического расхождения на динамические характеристики регистрируемых импульсов. Кроме того, в такой конструкции неизменной оставалась и ориентация источника и приемника относительно лучей падающей и отраженной волн, соответственно, что исключало влияние их диаграмм направленности.

Также нужно отметить, что при преобладающей частоте датчиков 1,7 МГц длина волны в воде составляла около 0.9 мм, так что расстояние от источника до отражающей поверхности превышало длину волны более чем в 70 раз. Это позволяет считать фронт падающей на границу волны квазиплоским и проводить сравнение с теоретическими коэффициентами отражения для плоских волн.

Для экранирования прямой волны при регистрации отражений использовалась тонкая пластина пенопласта, которую располагали между датчиками. Вся конструкция вместе с образцом на время эксперимента помещалась в емкость с водой.

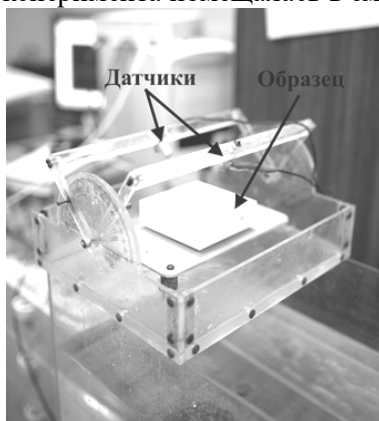


Рисунок 2. Экспериментальная установка.

### Методика эксперимента и физического моделирования

В лабораторном эксперименте нам нужно определить амплитуду продольной волны после отражения от границы воды с поверхностью образца. Для этого рычаги с источником и приемником устанавливались под одинаковыми углами симметрично относительно вертикальной плоскости, проходящей через ось их вращения. Таким образом, чтобы эти углы были равны углу отражения от границы воды с поверхностью образца. В экспериментах угол падения последовательно изменялся в пределах от 80 до 10 градусов с шагом от 5 до 1 градуса. Также регистрация отраженной волны производилась под различными азимутальными углами 0°, 45° и 90°.

Источник выдавал упругие волны, при подаче на него прямоугольных импульсов амплитудой 60 вольт. Приемник регистрировал отраженные от границы вода-образец упругие волны, преобразовывал их в электрические импульсы, эти импульсы с помощью цифрового осциллографа записывались в память компьютера.

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 отраженных волн при различных углах падения. Для увеличения отношения сигнал/помеха при регистрации проводилось 200-кратное накопление сигналов. Визуальный контроль регистрируемых сигналов в ходе эксперимента производился с помощью осциллографа.

Обработка экспериментальных данных состояла в том, что по записям прямой и отраженных при разных углах падения волн определялась разность экстремумов первой

положительной фазы сигнала и следующей за ней отрицательной фазы. Для более точного нахождения экстремумов производилась интерполяция дискретных значений сигналов полиномом третьей степени. Далее полученные разности для разных углов падения были поделены на разность фаз для прямой волны и построен соответствующий график зависимости модуля коэффициента отражения от угла падения.

В качестве образца использовался плексиглас, на гладкой поверхности которого уже были проведены эксперименты. Результаты описаны в работе Ю.И. Колесникова [13]. Непосредственно для этой работы образцы изготавливались на ЧПУ станке, для которого была написана программа, которая моделировала шероховатые поверхности образцов. Характерный размер ребристой поверхности с треугольным и квадратным профилем, задавался как 0.25, 0.5, 1, 2 мм (рис. 3 а, б). Размеры были выбраны, исходя из длины волны, которая в воде составляет примерно 0.9 мм.

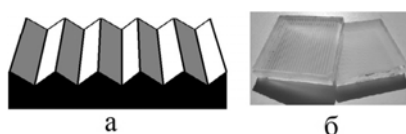


Рисунок 3. Схематические шероховатые модели (а) и фотография исследуемых образцов (б).

По ходу эксперимента возникало ряд трудностей со стабильностью работы генератора, качеством воды, а также с настройкой горизонтальности исследуемой поверхности. Все эти моменты были отработаны на гладкой поверхности, до получения результата схожего с теорией.

### Экспериментальные данные для зеркальной границы и границ с линейными разномасштабными шероховатостями

Эксперименты были проведены на отражение ультразвуковых импульсов от границы воды с гладкой, либо с линейными разномасштабными шероховатыми поверхностями плексигласа.

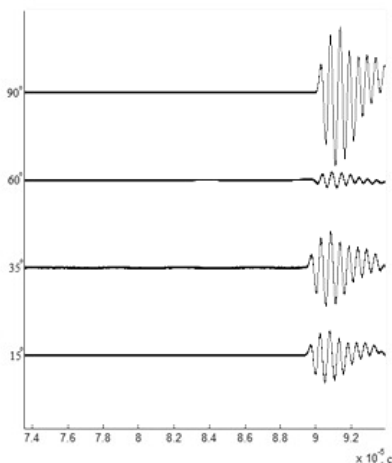


Рисунок 4. Сигналы прямой и отраженных волн.

На рис. 4 приведены зарегистрированные сигналы прямой (условно обозначена углом 90°) волны и сигналы волн, отраженных под углами 15°, 35° и 60° для образца с гладкой поверхностью.

Теперь для наглядности приведем серию сейсмограмм с результатами регистрации

отраженных ультразвуковых волн для разных углов падения и образцов с различной шероховатостью (рис. 5).

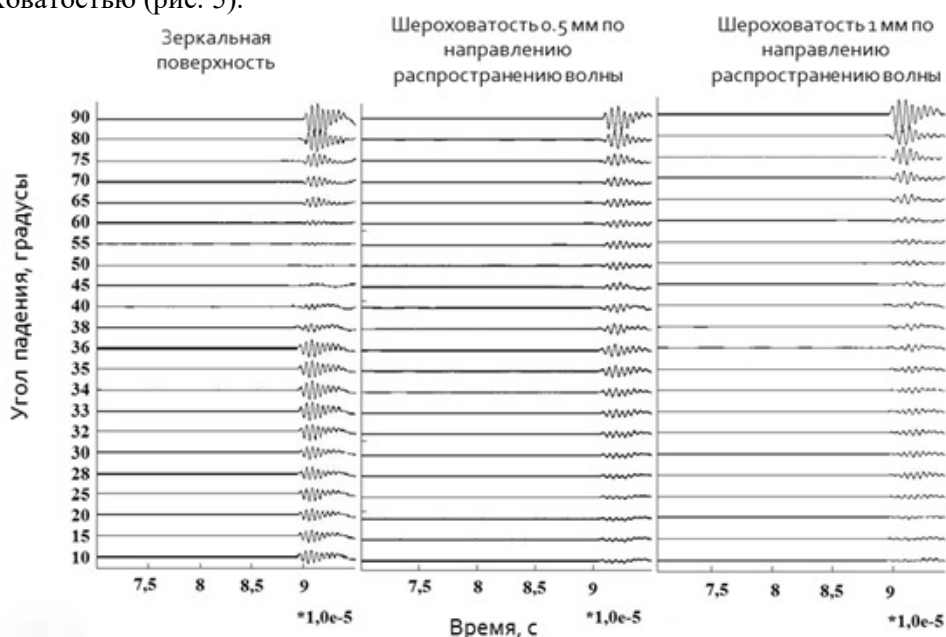


Рисунок 5. Сейсмограммы для зеркальной поверхности и поверхностей с шероховатостью в 0.5 и 1.0 мм по направлению распространения волны.

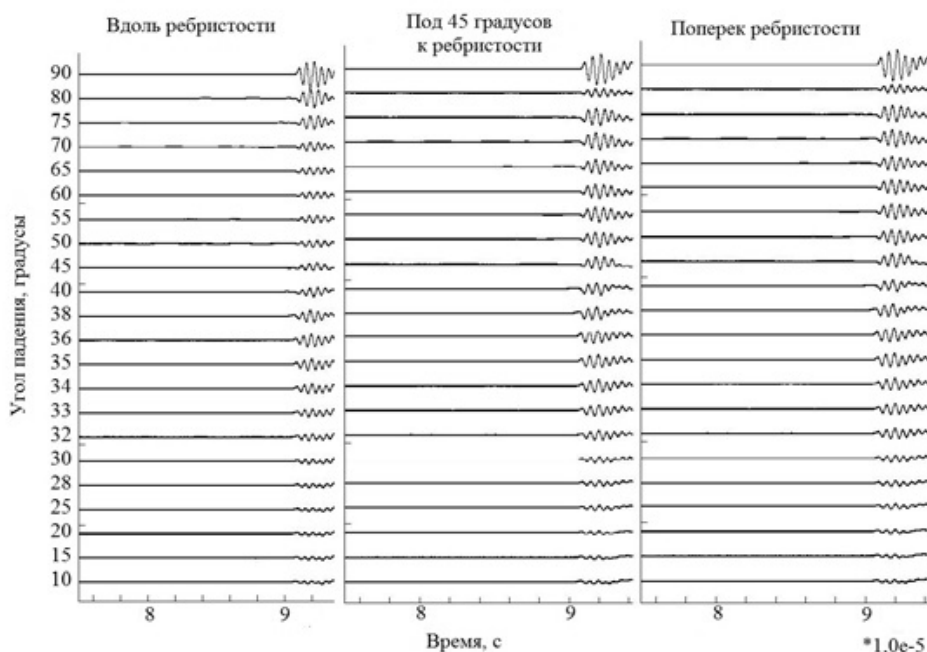


Рисунок 6. Сейсмограммы для поверхности с шероховатостью в 0.5 мм и азимутами распространения волны вдоль, поперек и под 45° к направлению ребристости.

Левый набор сеймотрасс соответствует зеркальной поверхности. Визуально можно заметить, что амплитуда сигналов при изменении угла падения от 90° до 50° достаточно резко уменьшается, а затем увеличивается до критического угла, а далее идет уменьшение и стабилизация. Эти экспериментальные данные согласуется с

теоретической кривой [13].

Далее, в случае с шероховатостью мы видим тенденцию к постепенному уменьшению амплитуды и небольшого увеличения в районе критического угла. С увеличением шероховатости видно более резкое уменьшение амплитуды.

На рис. 6 выведены экспериментальные сейсмограммы для поверхности с шероховатостью 0,5 мм и каждая из сейсмограмм соответствует своей ориентации штриховки. Можно визуально отметить, что с увеличением азимутального угла амплитуда сигнала затухает медленнее при уменьшении угла падения. Все сейсмограммы были выведены с помощью программы в пакете MATLAB.

### Определение коэффициентов отражения от различных границ

При построении графика зависимости коэффициента отражения от угла падения продольной волны был исследован диапазон углов падения от  $10^\circ$  до  $80^\circ$ . Результаты измерений коэффициента отражения от гладкой границы вода-плексиглас показаны на рис. 7. Там же показана теоретическая зависимость коэффициента отражения от угла падения. Эти результаты были получены, для дальнейшего сравнения с кривыми коэффициентов отражения для шероховатых поверхностей.

При расчетах теоретической зависимости принимались следующие значения для плотности и скорости звука в воде:  $1 \text{ г/см}^3$  и  $1480 \text{ м/с}$ . Декремент поглощения при расчетах в воде не учитывался в предположении, что водная среда абсолютно упругая. Плексиглас характеризуется следующими параметрами: скорость продольных и поперечных волн  $V_p = 2725 \text{ м/с}$  и  $V_s = 1385 \text{ м/с}$ , декременты поглощения  $\delta_p = 0.042$  и  $\delta_s = 0.049$ , плотность  $\rho = 1.18 \text{ г/см}^3$  [13].

Мы рассчитали зависимость модуля коэффициента отражения от угла падения для этого случая, воспользовавшись компьютерной программой для плоских волн из [15]. Заметим, что в наших экспериментах волны могут рассматриваться как практически плоские [16], так как расстояние от излучателя до площадки отражения превышает длину волны на преобладающей частоте в несколько десятков раз.

На рис. 7 сплошная линия описывает значения коэффициентов отражения по описанной выше методике для различных углов падения. Звездочки показывает теоретическую зависимость для модуля коэффициента отражения. Для построения всех экспериментальных кривых была написана программа в пакете MATLAB.

Заметим, что экспериментальная кривая на качественном уровне согласуется с теоретической кривой, за исключением острого пика в районе углов близких к критическому ( $34^\circ$ ), хотя сам критический угол на экспериментальной кривой несколько больше, что может быть связано со смещением ультразвукового пучка. Максимальное значение пика уменьшается на 20%.

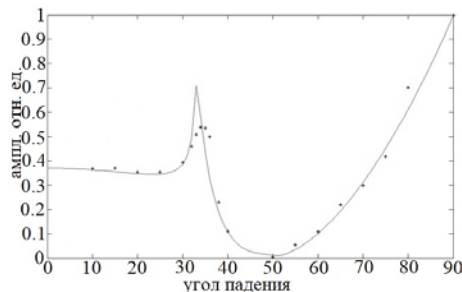


Рисунок 7. Экспериментальная кривая и теоретические точки (крестики) зависимости коэффициента отражения от угла падения на границу вода / плексиглас.

Основные исследуемые образцы были сделаны из такого же материала.

Шероховатость, а именно ребристость представляла собой, вытянувшиеся вдоль образца борозды с треугольной формой в разрезе. Высота этого треугольника соответствовала размеру шероховатости, треугольник является равнобедренным с прямоугольным углом в вершине.

### Сравнение и анализ полученных результатов

Для сравнения и анализа полученных данных использовалось объединение и наложение друг на друга графиков по определенным характеристикам результатов.

Первая группа диаграмм (рис. 8) сортированы по характерному размеру шероховатости. Каждый график на этих диаграммах соответствует результатам полученных для определенного азимутального угла, также на диаграммах изображены, синей сплошной линией, теоретическая зависимость коэффициента отражения с наложенными экспериментальными значениями от гладкой поверхности.

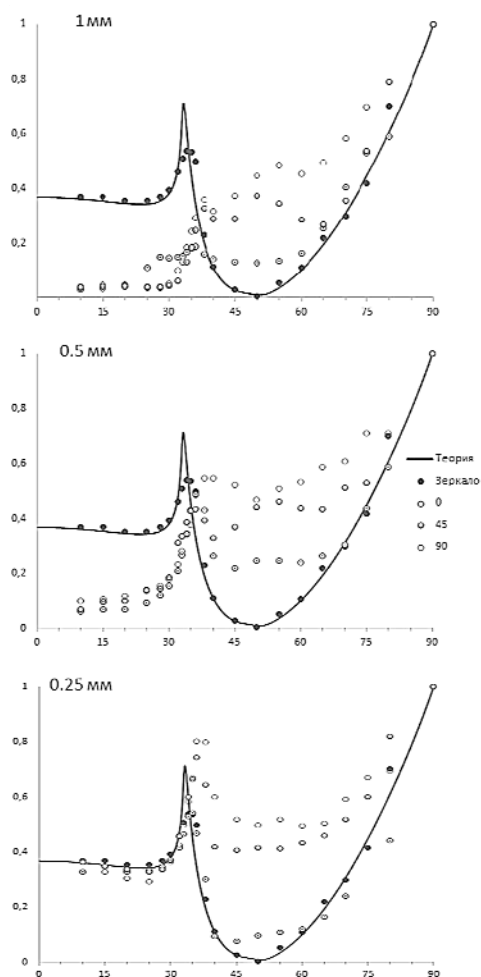


Рисунок 8. Диаграммы зависимости коэффициентов отражения от угла падения на границу воды и шероховатой границы с размером шероховатости 0.25, 0.5, 1 мм соответственно.

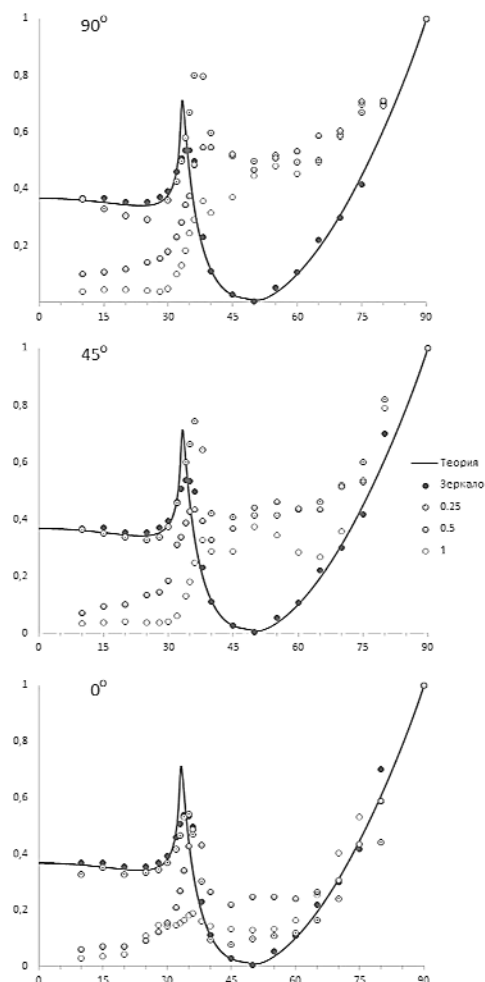


Рисунок 9. Диаграммы зависимости коэффициентов отражения от угла падения на границу воды и шероховатой границы с азимутами ребристости 0°, 45°, 90° соответственно.

Из этих диаграмм следует, что при относительно малой шероховатости 0.25 мм независимо от азимутального угла экспериментальные значения коэффициентов

отражения практически совпадают со значениями для гладкой поверхности при углах падения меньших критического. А при углах больше критического видно, что значения коэффициентов отражения растут с увеличением азимутального угла.

Далее при увеличении шероховатости поверхности видно, что докритические значения уменьшаются, и чем больше шероховатость, тем сильнее уменьшаются. В закритической зоне, также видно, что значения коэффициентов увеличены относительно коэффициентов для гладкой поверхности, а также стабильность коэффициентов отражения нарушается с приближением размера шероховатости к длине волны.

Вторая группа диаграмм (рис. 9) сортированы по азимутальному направлению ребристости образцов. Графики на этих диаграммах соответствуют образцу с определенным размером шероховатости. И также как ранее, на диаграммах изображены, синей сплошной линией, теоретическая зависимость коэффициента отражения с наложенными экспериментальными значениями от гладкой поверхности.

Здесь мы наблюдаем, что значения коэффициентов отражения в докритической зоне уменьшены, а в закритической зоне увеличены. Так же прекрасно видно, что мелкая шероховатость при любых азимутах в докритических углах близка к значениям для гладкой поверхности, и почти полностью совпадает со случаем зеркальной границы во всем диапазоне при нулевом азимуте, в остальных случаях мы видим увеличение отклонение от теоретической кривой с увеличением шероховатости.

Наблюдается еще одна особенность, что при увеличении азимута, увеличивается и значение коэффициент отражения при критическом угле, это хорошо заметно на графиках для шероховатости 0.25 мм.

Графики для шероховатости в 2 мм, не приводятся в связи с отсутствием выраженной отраженной волны.

## Выводы

Изменение коэффициента отражения от шероховатой границы зависит от соотношения длины волны и характерного размера шероховатости. При размере шероховатости выше длины волны в воде отраженные волны практически не наблюдаются.

При фиксированном характерном размере шероховатости увеличение азимута плоскости падения по отношению к направлению линейной шероховатости ведет к уменьшению коэффициента отражения на докритических и увеличению на закритических углах относительно коэффициентов отражения для гладкой поверхности.

При фиксированном азимуте возрастание характерного размера шероховатости также ведет к уменьшению коэффициентов отражения на докритических и увеличению на закритических углах относительно коэффициентов отражения для гладкой поверхности.

*Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 19-05-00730, а также проекта ФНИ № 0331-2019-0009.*

## Литература / References:

1. ГОСТ 16821-91. Сейсморазведка. Термины и определения. М.: Издательство стандартов, 1992. 28 с.
2. 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 // J. Acoust. Soc. Am. 2009. V. 126 (6). pp. 2939–2948.
3. 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 // J. Appl. Phys. 2005. V. 97(8/084904). pp. 1–4.
4. Breazeale M.A., Torbett M.A. Backward displacement of waves reflected from an interface having superimposed periodicity // Applied Physics Letters. 1976. V. 29 (8). pp. 456–458.
5. Teklu A.A., Breazeale M.A. Backward displacement of ultrasonic waves reflected from a corrugated interface // J. Acoust. Soc. Am. 2003. V. 113. Is. 4. pp. 2283.
6. 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.
7. 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 // J. Acoust. Soc. Am. 1994. V. 96 (1). pp. 363–369.
  8. Lynn H.B., Simon K.M., Bates C.R., Van Dok R. Azimuthal anisotropy in P-wave 3-D (multiazimuth) data // The Leading Edge. 1996. V. 15(8). pp. 923–928.
  9. Mallick S., Craft K.L., Meister L.J., Chambers R.E. Determination of the principal directions of azimuthal anisotropy from P-wave seismic data // Geophysics. 1998. V. 63 (2). pp. 692 – 706.
  10. Jenner E. Azimuthal AVO: Methodology and data examples // The Leading Edge. 2002. V. 21 (8). pp. 782–786.
  11. Hall S.A., Kendall J-M. Fracture characterization at Valhall: Application of P-wave amplitude variation with offset and azimuth (AVOA) analysis to a 3D ocean-bottom data set // Geophysics. 2003. V. 68(4). pp. 1150–1160.
  12. Нефедкина Т.В., Карстен В.В., Егорова А.А. Пространственный анализ амплитуд отраженных продольных волн в азимутально-анизотропных средах // Технологии сейсморазведки. 2011. № 3. С. 42–48.
  13. Колесников Ю.И. Отражение ультразвуковых импульсов от границы воды с неидеально упругими средами: экспериментальные данные для случая наклонного падения // Физ. мезомех. 2005. Т. 8. №1. С. 91–97.
  14. Колесников Ю.И., Федин К.В., Орлов Ю.А. Физическое моделирование отражения упругих волн от азимутально-анизотропной среды // Сб. матер. XIV Межд. науч. конгр. «Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Экономика. Геоэкология» в 6 т. Новосибирск: СГУГиТ, 2018. Т. 3. С. 191–198.
  15. Young G.B., Brail L.W. A computer program for the application of Zoeppritz's amplitude equations and Knott's energy equations // Bul. Seismol. Soc. Am. 1976. V. 66(6). pp. 1881–1885.
  16. Аки К., Ричардс П. Количественная сейсмология: Теория и методы. М.: Мир, 1983. Т. 1. 520 с.