АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ, 2017, том 63, № 2, с. 152–157

НЕЛИНЕЙНАЯ АКУСТИКА

УДК 534.2

ДИАГНОСТИКА УПРУГИХ СВОЙСТВ ПЛОСКОЙ ГРАНИЦЫ ДВУХ ШЕРОХОВАТЫХ СРЕД ПОВЕРХНОСТНЫМИ АКУСТИЧЕСКИМИ ВОЛНАМИ

© 2017 г. А. И. Кокшайский, А. И. Коробов, Н. В. Ширгина*

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, физический факультет
119991 ГСП-1, Москва, Ленинские горы
**e-mail: Natalia.shirgina@physics.msu.ru*

Поступила в редакцию 20.04.2016 г.

Приводятся результаты экспериментальных исследований нелинейных упругих свойств плоской границы двух сред: подложки из оптически полированного стекла и плоских образцов с различной степенью шероховатости. Исследования нелинейных упругих свойств границы двух сред проводились с помощью поверхностных акустических волн (ПАВ) спектральным методом. Исследовано влияние внешнего давления, приложенного к границе, на эффективность генерации второй гармоники ПАВ. По измеренным амплитудам первой и второй гармоник поверхностной акустической волны, прошедшей вдоль границы, был рассчитан нелинейный акустический параметр второго порядка в зависимости от внешнего давления, приложенного к образцу при фиксированном значении амплитуды зондирующей волны. Обнаружено, что нелинейный параметр ПАВ немонотонно зависит от давления на границе. Проведен анализ полученных результатов на основе теории упругой контактной нелинейности и сделан вывод, что эти результаты могут быть использованы в неразрушающем контроле для диагностики шероховатости и волнистости поверхности плоских твердых тел.

Ключевые слова: диагностика шероховатой границы, поверхностные акустические волны, генерация упругих гармоник, неклассическая нелинейность, нелинейный акустический параметр, контакт Герца.

DOI: 10.7868/S0320791917010038

1. ВВЕДЕНИЕ

Исследования особенностей прохождения акустических волн через плоскую шероховатую границу двух твердых тел давно представляют значительный интерес. Эти работы имеют практическую значимость, поскольку могут быть использованы для неразрушающей акустической диагностики твердых тел; кроме того, они интересны с точки зрения изучения механизмов структурной упругой нелинейности на границе двух твердых тел. Первые исследования показали, что граница двух плоских твердых тел обладает сильной упругой нелинейностью, которая может значительно превышать упругую нелинейность, связанную с ангармонизмом кристаллической решетки [1, 2]. Авторами работ [1, 2] было проведено как аналитическое, так и экспериментальное изучение прохождения продольной волны через плоскую шероховатую границу двух изотропных твердых сред. Нелинейные упругие свойства контакта двух твердых сред экспериментально исследовались спектральным методом по эффективности генерации второй упругой гармоники. Амплитуда второй гармоники немонотонно зависела от величины давления, приложенного к контакту. Особенности нелинейного отражения плоской сдвиговой упругой волны, падающей под углом 45° к границе раздела двух шероховатых поверхностей, экспериментально исследованы в [3]. В спектре отраженной от границы волны регистрировались сдвиговые волны основной частоты и второй гармоники. Было обнаружено, что с увеличением давления, приложенного к границе, амплитуда отраженной волны основной частоты монотонно уменьшалась, в то время как амплитуда второй гармоники сдвиговой волны немонотонно зависела от давления: с увеличением давления сигнал второй гармоники сначала увеличивался, достигал максимума и при дальнейшем увеличении давления уменьшался. Результаты этого эксперимента были проанализированы в [4]. В этой работе был предложен физический механизм упругой нелинейности плоской границы шероховатых поверхностей и объяснено влияние внешнего давления на особенности поведения упругих волн первой и второй гармоники на границе. В [4] также было отмечено, что исследования зависимости отраженной от границы второй

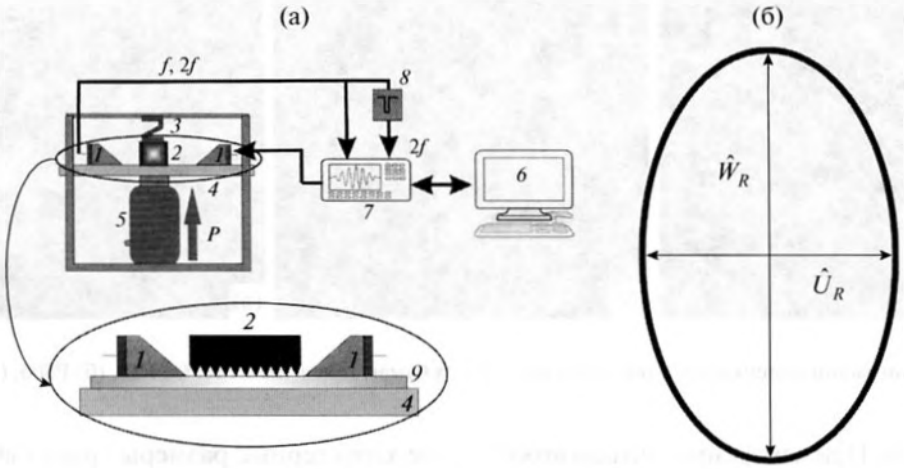

Рис. 1. (а) Экспериментальная установка для исследования распространения поверхностных волн. *1* – клиновые преобразователи для возбуждения и приема поверхностных волн, *2* – образец, *3* – датчик давления, *4* – пластина из дюралюминия, *5* – домкрат, *6* – компьютер со встроенным АЦП, *7* – генератор и усилитель, *8* – режекторный фильтр, *9* – подложка из полированного оптического стекла. (б) Продольная и поперечная компоненты поверхностной акустической волны.

упругой гармоники от давления позволяют определить статистические характеристики шероховатых поверхностей. Особенности отражения и прохождения акустического импульса через границу двух плоских поверхностей с жидким слоем между ними проанализированы в [5, 6]. Нелинейное отражение упругой плоской продольной волны, падающей перпендикулярно границе "гранулированный слой–плоское твердое тело", исследовано в работе [7], в которой проанализировано влияние диаметра гранул в слое на нелинейный акустический параметр системы.

В перечисленных выше работах нелинейные свойства границы исследовались с помощью плоских объемных продольных и сдвиговых волн. Поверхностные волны для таких исследований практически не применялись, за исключением двух известных нам ранних работ [8, 9]. В то же время диагностика с помощью поверхностных акустических волн (ПАВ) является одним из удобных способов изучения структурных дефектов на границе твердых тел. Так, в работе [10] представлены результаты экспериментального исследования нелинейных процессов, возникающих при взаимодействии поверхностных акустических волн с трещиноватыми дефектами на плоской поверхности твердого тела. Целью настоящей работы является изучение влияния степени шероховатости границы двух сред на ее нелинейные упругие свойства с помощью ПАВ и исследование возможности использования обнаруженных нелинейных эффектов для диагностики состояния поверхности материалов с использованием ПАВ.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ МЕТОДИКА И ИССЛЕДУЕМЫЕ ОБРАЗЦЫ

Экспериментальная установка состояла из следующих компонентов (рис. 1а):

– ультразвуковой автоматизированный измерительный комплекс, разработанный на основе импульсного приемо-передатчика RPR-4000 фирмы RITEC;

– система создания контролируемой силы, действующей на образец;

– подложка для создания ПАВ с диагностируемым образцом;

– режекторный фильтр на частоту зондирующей волны 1.25 МГц;

– осциллограф Agilent Technologies DSO7043 для наблюдения формы сигналов.

Для оцифровки ультразвукового сигнала использовался вставленный в слот ПК двенадцатиразрядный аналогово-цифровой преобразователь (АЦП) LA-n20-PCI с частотой дискретизации 50 МГц. Исследования свойств границы двух сред проводились с помощью поверхностных акустических волн, которые возбуждались и принимались в подложке из оптически полированного стекла клиновыми ультразвуковыми преобразователями П131-1.25-0.64-001 и П131-2.5-0.64-001, производство "Системы Старманс". Для возбуждения ПАВ в подложке из оптически полированного стекла использовался клиновый преобразователь с резонансной частотой 1.25 МГц; прошедшая через границу подложка–образец (ПО) ПАВ регистрировалась клиновым преобразователем с резонансной частотой 2.5 МГц. Этот преобразователь эффективно регистрировал ПАВ с часто-

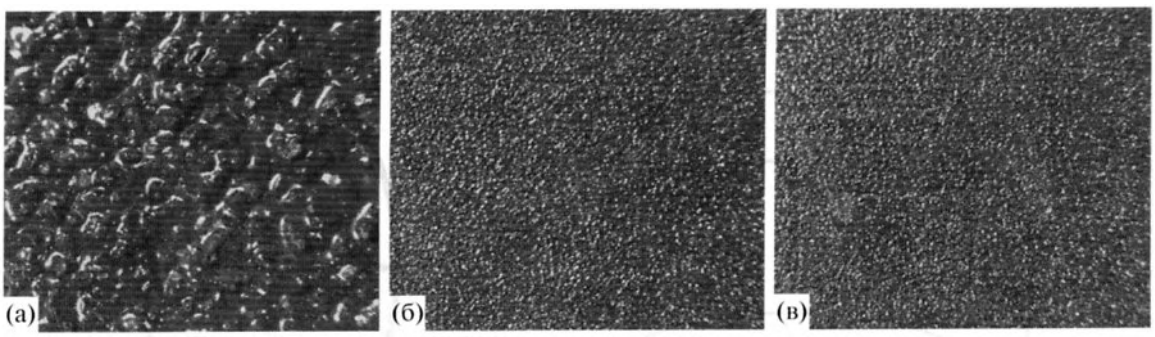

Рис. 2. Фотографии поверхностей образцов наждачных бумаг. Масштаб 1 : 10. (а) P60, (б) P800, (в) P1000.

тами 1.25 и 2.5 МГц. При измерении сигнала второй гармоники ПАВ на частоте 2.5 МГц применялся режекторный фильтр на частоту зондирующего сигнала. Фильтр подавлял сигнал первой гармоники на 40 дБ. Диагностируемый образец прижимался к подложке с ПАВ с помощью домкрата. Сила, прикладываемая к границе ПО, измерялась электронным датчиком. Электрический сигнал с датчика, пропорциональный приложенной силе, оцифровывался 16-разрядным АЦП фирмы National Instruments (USA) с частотой дискретизации 400 кГц. АЦП по каналу USB был соединен с ПК. Цифровая информация с двух АЦП в ходе эксперимента поступала в персональный компьютер для ее хранения и анализа. С целью управления работой комплекса и проведения ультразвуковых измерений с автоматической регистрацией результатов ультразвукового эксперимента для ПК был разработан пакет программ. Измерения нелинейных упругих свойств границы ПО проводились спектральным методом по эффективности генерации второй гармоники ПАВ.

Подложка вместе с клиновыми преобразователями размещалась на плоскопараллельной пластине толщиной 1 см из дюралюминия. Между алюминиевой и стеклянной пластинами помещалась тонкая компенсирующая прокладка из полиэтилена. Это предохраняло стеклянную подложку от разрушения при приложении к ней внешней силы во время эксперимента. К стеклянной пластине с помощью домкрата прижимались образцы с различной степенью шероховатости их поверхности. Внешнее статическое давление реверсивно изменялось в интервале $0 < P < 4100$ кПа. В качестве образцов использовалась наждачная бумага с известными размерами гранул абразивного материала. Было использовано три типа наждачных бумаг, которые имели различные размеры гранул абразивного материала: P60 (размеры гранул 250–300 мкм), P800 (20.8–22.8 мкм), P1000 (14–20 мкм). Число после "P" в обозначении типа бумаги равно числу проволок на дюйм в сите, используемом для просеивания абразивного материала при изготовлении наждачной бумаги. Чем выше номер P, тем меньше характерные размеры гранул абразивного материала и больше количество зерен абразива, приходящихся на единицу площади образца. С уменьшением номера P увеличивается размер и величина дисперсии размеров гранул абразивного материала. Поверхности с разной степенью шероховатости были выбраны для того, чтобы проследить тенденцию – как влияет степень шероховатости на нелинейные упругие свойства границы ПО. На рис. 2 приведены фотографии поверхностей исследованных образцов.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В спектре ПАВ конечной амплитуды, прошедшей вдоль границы, кроме сигнала на частоте зондирующей волны $f = 1.25$ МГц с амплитудой A_f регистрировалась его вторая гармоника с амплитудой A_{2f} на частоте $2f = 2.5$ МГц:

$$A = A_f \sin(2\pi ft - kl) + A_{2f} \sin[2(2\pi ft - kl)]. \quad (1)$$

Зависимость амплитуды второй гармоники A_{2f} от амплитуды основной волны A_f в твердых телах определяется выражением

$$A_{2f} = \frac{Nk_f^2 L}{8} A_f^M, \quad (2)$$

N – нелинейный акустический параметр второго порядка (НАП), k_f – волновой вектор основной волны, L – длина образца [11].

В работе была экспериментально исследована зависимость амплитуды второй гармоники ПАВ от амплитуды основной волны при различных статических давлениях, приложенных к границе ПО (см. рис. 3). В спектре ПАВ конечной амплитуды, прошедшей вдоль границы ПО, наблюдались как первая гармоника на частоте 1.25 МГц, так и вторая гармоника ПАВ на частоте 2.5 МГц. Источниками сигнала второй гармоники ПАВ могут быть следующие причины: генерация высших гармоник пьезокерамическими элементами в клиновых преобразователях, контактная нели-

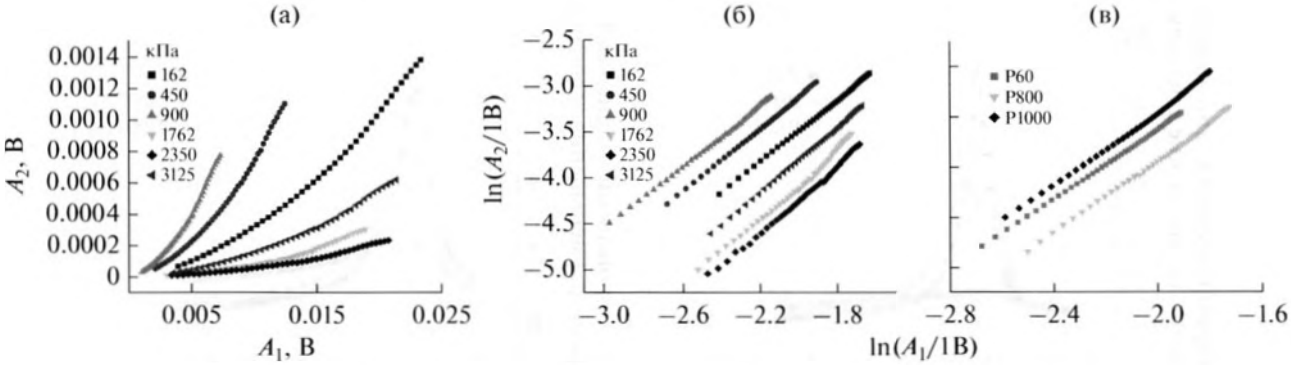

Рис. 3. Зависимость амплитуды второй гармоники от амплитуды первой гармоники в линейном и двойном логарифмическом масштабах при внешнем давлении (а, б) для образцов P60 и (в) в двойном логарифмическом масштабе для исследуемых образцов.

нейность на границе клиновый преобразователь–подложка, упругая нелинейность, связанная с ангармонизмом межатомного взаимодействия в подложке, и неклассическая нелинейность на границе между подложкой и тестовым образцом. Первые три причины генерации сигнала второй гармоники не зависят от величины давления, приложенного к границе ПО. Поэтому можно считать, что упругая нелинейность в исследуемой системе в основном определяется структурной нелинейностью на границе ПО. Причина проявления неклассической упругой нелинейности на границе двух шероховатых поверхностей следующая. ПАВ имеет эллиптическую поляризацию и содержит две упругие компоненты: поперечную компоненту, нормальную к границе, и продольную компоненту, параллельную границе двух сред (рис. 1б) [12]. Вследствие этого на границе поджатых шероховатых сред появляется два механизма неклассической упругой нелинейности: контактная нелинейность Герца, вызванная поперечной компонентой ПАВ, которая приводит к генерации второй гармоники ПАВ на поджатой границе ПО, и гистерезисная нелинейность, вызывающая генерацию нечетных гармоник, обеспеченная продольной компонентой ПАВ [10, 13]. Генерация нечетных гармоник нами в этой работе не исследовалась.

В бездефектном твердом теле упругая нелинейность определяется ангармонизмом межатомного взаимодействия, и в этом случае показатель степени в выражении (2) $M = 2$. Присутствие в материале различных дефектов приводит к появлению в твердом теле дополнительного механизма упругой нелинейности: структурной нелинейности. Возможные механизмы этой нелинейности подробно обсуждаются в [6]. В средах со структурной нелинейностью показатель степени M в (2) может отличаться от 2. Построив зависимость амплитуды второй гармоники от амплитуды первой гармоники в двойном логарифмическом масштабе (рис. 3в), по тангенсу угла наклона аппроксимирующей прямой можно определить показатель степени M в (2). В таблице приведены значения величины показателя степени M для исследованных в работе образцов. Для всех образцов $M < 2$, что указывает на то, что генерация второй гармоники на границе ПО обусловлена структурной нелинейностью.

Значения показателя M для различных образцов

Тип бумаги	P1000	P800	P60
M	1.83	1.81	1.72

При фиксированном значении амплитуды зондирующей волны для всех образцов, изображенных на рис. 2, была экспериментально измерена зависимость амплитуд первой и второй гармоник ПАВ от давления на границе. Эти измерения с учетом уравнения (2) позволили рассчитать зависимости НАП от величины приложенного к границе ПО давления, нормированные значения которых приведены на рис. 4а, 4б. (НАП для каждого образца был нормирован на его значение при минимальном давлении, использовавшемся в эксперименте.)

Как видно из рис. 4, НАП немонотонно зависит от давления, приложенного к границе ПО: с ростом давления он увеличивался, проходил через максимум и при дальнейшем увеличении давления уменьшался. Однако максимальная величина НАП и интервал давлений, в котором происходило изменение НАП, были различны для каждого образца: наибольшие значения НАП характерны для образца с наждачной бумагой P1000 с малыми размерами абразивных фракций. При этом интервал давлений, при котором НАП достигает максимума, увеличивается с увеличением размера гранул абразивного материла.

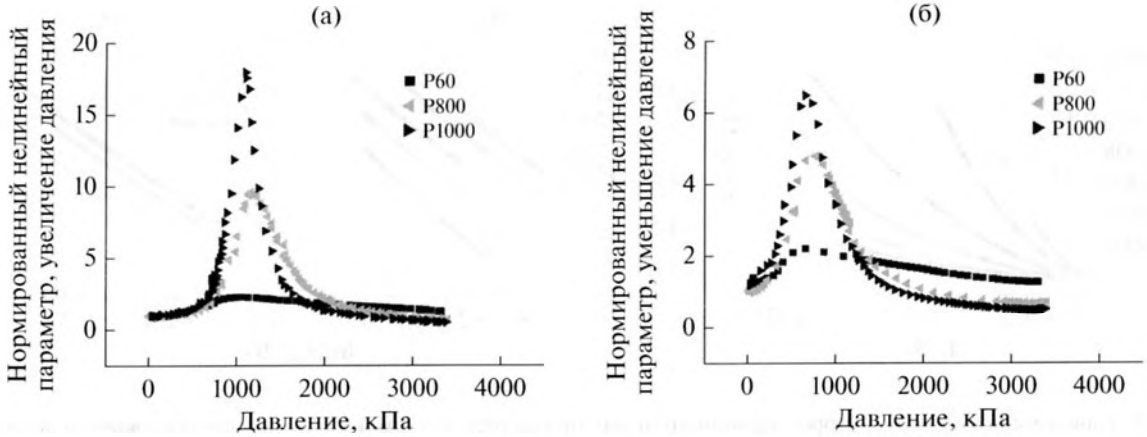

Рис. 4. Зависимость нормированного НАП от давления: (а) при увеличении и (б) при уменьшении внешнего статического давления.

Полученные зависимости НАП от давления объясняются следующим образом. При усилении давления число взаимодействующих между собой контактов поверхностей увеличивается, что влечет за собой рост нелинейности. После того как все контакты поджаты, НАП достигает максимума. При дальнейшем увеличении давления НАП уменьшается. Такое поведение НАП (рост, достижение максимума и последующий спад) определяется следующими процессами: сначала происходит увеличение числа контактов образца (число локальных источников нелинейности) вследствие дисперсии размеров абразивных гранул, вступающих во взаимодействие с подложкой при увеличении внешнего давления, действующего на границу ПО. После этого, когда все контакты задействованы, при дальнейшем росте давления на границе нелинейность согласно закону контактного взаимодействия Герца уменьшается. Наибольшая величина нормированного НАП у образцов с наименьшими размерами гранул объясняется большим количеством источников нелинейности Герца на единицу поверхности образца. С увеличением размеров гранул в образце также наблюдается увеличение интервала давления, в котором происходит изменение НАП. Это является следствием того, что при большем размере гранул на одинаковых площадях образца количество источников нелинейности уменьшается; в то же время дисперсия размеров гранул может для таких образцов изменяться в более широком диапазоне, в связи с чем увеличивается интервал давлений, в котором происходит изменение НАП.

ВЫВОДЫ

Проведены экспериментальные и теоретические исследования нелинейных упругих свойств границы подложки из оптически полированного стекла и плоских образцов с различной степенью шероховатости. Нелинейные упругие свойства границы подложка–образец диагностировались спектральным методом с помощью поверхностной акустической волны, распространяющейся по подложке вдоль границы. Измеренная экспериментально зависимость амплитуды второй гармоники ПАВ от амплитуды основной волны показала, что амплитуда второй гармоники ПАВ не пропорциональна квадрату амплитуды первой гармоники ПАВ. Это указывает на наличие структурной нелинейности на границе ПО. Экспериментально исследовано влияние статического давления, приложенного к границе ПО, на величину амплитуды прошедших вдоль границы первой и второй гармоник ПАВ. Это позволило определить зависимость нелинейного акустического параметра второго порядка для ПАВ от величины давления на границе. Было обнаружено, что НАП немонотонно зависит от величины внешнего давления, приложенного к границе ПО: при увеличении давления величина НАП проходит через максимум. Немонотонность зависимости НАП от давления объясняется наличием в образцах микроконтактов различной высоты. С увеличением давления на образец растет число микроконтактов, являющихся источниками упругой нелинейности между поверхностями, и, как следствие, увеличивается упругая нелинейность на границе ПО. При дальнейшем увеличении давления, когда все имеющиеся контакты вступили во взаимодействие, согласно теории контактного взаимодействия Герца упругая нелинейность на границе ПО уменьшается. Величина максимума НАП, а также его ширина в зависимости от внешнего давления зависели от степени шероховатости поверхности образца. С увеличением размеров гранул в образце наблюдается уменьшение нормированной ве-

личины НАП и увеличение интервала давлений, в котором наблюдался максимум НАП. При большем размере гранул на одинаковых площадях образца количество источников нелинейности уменьшается, в то же время размеры гранул в таких образцах находятся в более широком диапазоне (это видно, например, на рис. 2а), что приводит к увеличению интервала давлений, в котором происходит изменение НАП. Предложенная в работе экспериментальная методика исследования нелинейных упругих свойств границы подложки из оптически полированного стекла и плоских образцов с различной степенью шероховатости с помощью ПАВ может быть использована в неразрушающем контроле для диагностики шероховатости и волнистости поверхности плоских твердых тел и оценки качества полировки поверхностей.

Исследования выполнены за счет гранта Российского научного фонда (проект № 14-22-00042).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Richardson J.M.* Harmonic generation at an unbonded interface. I. Planar interface between semi-infinite elastic media // Int. J. Eng. Sci. 1979. V. 17. P. 73–85.
2. *Buck O., Morris W.L., Richardson J.N.* Acoustic harmonic generation at unbonded interfaces and fatigue cracks // Appl. Phys. Lett. 1978. V. 33. № 5. P. 371–373.
3. *Северин Ф.М., Солодов И.Ю., Шкуланов Ю.Н.* Экспериментальное наблюдение нелинейности отражения звука от границы раздела твердых тел // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 3. Физ. Астрон. 1988. Т. 29. № 4. С. 94–96.
4. *Руденко О.В., Чинь Ань Ву.* Нелинейные акустические свойства контакта шероховатых поверхностей и возможности акустодиагностики статистических характеристик поверхностей // Акуст. журн. 1994. Т. 40. № 4. С. 668–672.
5. *Hedberg C.M., Rudenko O.V.* Pulse response of nonlinear layer // J. Acoust. Soc. Am. 2001. V. 110. № 5. P. 2340–2350.
6. *Собисевич Л.Е., Собисевич А.Л.* О нелинейном отклике слоя на импульсное воздействие // Гидроакустический журнал (Проблемы, методы и средства исследований Мирового океана). 2004. № 1. С. 84–90.
7. *Коробов А.И., Ширгина Н.В., Кокшайский А.И.* Влияние давления на нелинейное отражение упругих волн от границы двух твердых сред // Акуст. журн. 2015. Т. 61. № 2. С. 182–190.
8. *Rischbieter F.* Messungen an Oberflachenwellen in festen Korpern // Acustica. 1965. V. 16. P. 75–83.
9. *Rischbieter F.* Messung des nichtlinearen Schallverhaltens von Aluminium mit Hilfe von Rayleighwellen // Acustica. 1967. V. 18. P. 109–112.
10. *Коршак Б.А., Коршак Ю.Б.* Нелинейное отражение поверхностных акустических волн от линии контакта твердых тел // Письма в ЖТФ. 2008. Т. 34. № 11. С. 68–73.
11. *Руденко О.В.* Гигантские нелинейности структурно-неоднородных сред и основы методов нелинейной акустической диагностики // Усп. физ. наук. 2006. Т. 176. № 1. С. 77–95.
12. *Джонсон К.* Механика контактного взаимодействия. М.: Мир, 1989. 509 с.
13. *Meziane A., Norris A.N., Shuvalov A.L.* Nonlinear shear wave interaction at a frictional interface: Energy dissipation and generation of harmonics // J. Acoust. Soc. Am. 2011. V. 130. № 4. P. 1820–1828.