

Научная статья

О рассеянии релеевских и продольных сейсмических волн на локальной неровности грунта

Ю.М. Заславский¹, В.Ю. Заславский^{1,2}

¹ Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород, Российская Федерация

² Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет имени Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Российская Федерация

Выполнено 3-D численное моделирование рассеяния сейсмических поверхностных релеевских и продольных волн, распространяющихся по грунту, плотность и упругость которого типичны для геосреды. На границе грунта имеется локальная неровность в виде пустотелой полусферической выемки (усеченной сферы). Показано, что направленность поля рассеяния зависит от вида неоднородности. Из литературы известно, что при переходе к другому виду неоднородности, например, к покрытию границы тонким инертным (массивным) слоем в виде кружка, возникает рассеяние вперед. Рассматривается импульсный режим зондирования неоднородности. В качестве излучателя предлагается использовать короткоимпульсный источник, например, гидроакустический излучатель или подобный ему пульсирующий монополь, неглубоко погруженный под свободную границу. Таким образом, генерируются упругие волны – поверхностная релеевская и обратно отраженная продольная, для регистрации которых применяются сейсмические приемники, устанавливаемые на свободной границе по схеме, которая выглядит как решетка. Анализируется пространственное амплитудное распределение волнового поля в вертикальном (по центру неоднородности) и горизонтальном (на уровне свободной границы) сечениях среды. Характерные особенности волнового поля обусловлены его рассеянием на локальной неоднородности. Исследуются отличительные свойства в изображении волновых рельефов, образующихся на пересечении волновых фронтов продольных волн – отраженной от свободной границы и рассеянной на локальной неоднородности. Установлены признаки, указывающие на присутствие локальной неоднородности и позволяющие диагностировать ее параметры. Обсуждаются способы повышения достоверности и надежности реализации алгоритмов обнаружения и классификации неоднородностей, оценки их сложности, базирующиеся на использовании перечисленных типов волн. На основе применения все более коротких по длительности зондирующих импульсов демонстрируется возможность представления рельефов в деталях и, соответственно, потенциально достижимое пространственное разрешение при зондировании локальных подповерхностных неоднородностей.

Ключевые слова: сейсмические поверхностные релеевские и продольные объемные волны, рассеяние, одиночная неровность грунта, метод конечных элементов

Получение: 26.07.2023 / *Публикация онлайн:* 22.07.2024

УДК 534.26+502.04

1. Введение

Изучение особенностей рассеяния релеевских и продольных сейсмических волн техногенной природы при распространении вблизи поверхности грунта с маломасштабными (метровыми и дециметровыми) неровностями востребовано при решении проблем сейсмоакустики, строительной отрасли, технологии метроостроя и других народнохозяйственных областей. В качестве теоретической основы решения задач рассеяния как названных волн, так и волн родственных типов, распространяющихся по грунту (волн Лэмба и Лява), могут рассматриваться подходы, применяемые как к глобальным сейсмологическим проблемам [1], так и к проблемам более ограниченных размеров, например, в рамках технической акустики. Волны используются при ультразвуковой дефектоскопии, неразрушающем контроле (в том числе удаленном) качества поверхности конструкций и материалов, в машиностроении и электронной промышленности [2–17]. При этом существует необходимость учёта специфики, связанной с параметрами и характером среды, с диапазоном частот, которые обуславливают характер рассеяния сейсмических волн техногенной природы. Их учёт необходим при практическом выполнении работ по вышеперечисленным направлениям. В большинстве публикаций, отмеченных в ссылках, анализируются характеристики и особенности рассеяния релеевских волн, обусловленные статистически распределёнными неровностями, либо имеющими значительные в длину масштабы. В задачах диагностики дефектов часто обращаются к такой характеристике как сечение рассеяния. Она используется для количественного описания эффекта рассеяния на неоднородностях того или иного вида, обнаруживаемых с помощью ультразвуковой технологии контроля. В представленной статье не рассматриваются количественные характеристики, подобные упомянутой, но обсуждаются признаки, которые пригодны при поиске локальных одиночных неровностей на поверхности грунта или непосредственно под его границей с применением методов инженерной сейсморазведки. При зондировании границы основное внимание уделяется моделированию упругих поверхностных и объёмных продольных волн.

В развитие указанной темы в статье представлены некоторые результаты 3-D численного моделирования распространения сейсмических волн вблизи поверхности грунта, имеющей локальную неоднородность вида либо усеченной наполовину, либо заглубленной под границу сферической полости. Целью работы (методической направленностью) является исследование особенностей, проявляющихся и наблюдаемых при рассеянии релеевской поверхностной и объемной продольной волн на одиночной неровности указанного вида. Интерес представляют характерные, устойчиво присутствующие признаки, сигнализирующие о наличии неоднородности, информативные при диагностике ее параметров, в том числе, глубины расположения под границей. Для наглядности используется изображение амплитудного волнового распределения в различных пространственных плоскостях: в горизонтальной (x,y) и вертикальной (x,z) . В перспективе может быть сформулирована методика зондирования и диагностики неровностей метрового и дециметрового масштаба. Предполагается разработка алгоритма программной реализации удаленного контроля и диагностики материальных характеристик и геометрических параметров уединенной неоднородности, расположенной у границы среды.

2. Постановка задачи, источник зондирования, неровность на (под) границе(й)

Рассматривается локальная неоднородность у поверхности упругого полупространства — пустотелая сфера радиусом 1 м, погруженная в геосреду на глубину от половины диаметра до его целого значения. В первом случае это полусферическая выемка, обращенная раскрытием к свободному пространству, в последнем — сфера, практически полностью находящаяся в грунте. Общий вид полупространства с локальной неоднородностью сферической конфигурации при разной глубине погружения представлен на рисунке 1.

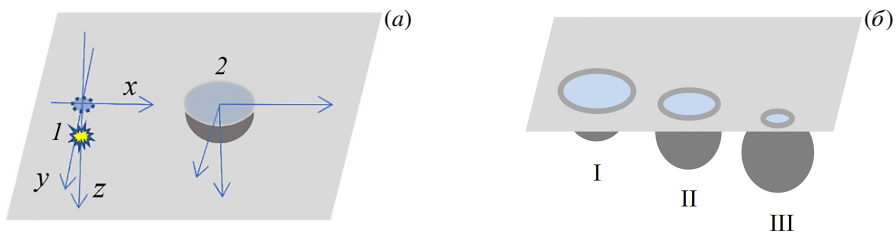


Рис. 1. Схема расположения источника и неоднородности (а): 1 – акустический источник, 2 – неоднородность вблизи поверхности грунта (зондируемый объект на границе или под ней); примеры погружения неоднородности в грунт (по нижней точке) (б): I – $h_1 = 1$ м, II – $h_2 = 1.5$ м, III – $h_3 = 1.9$ м

При моделировании выбраны следующие параметры грунта: плотность $\rho = 2 \cdot 10^3$ кг/м³; скорость распространения волн: продольных $c_l = 2.1 \cdot 10^3$ м/с, поперечных $c_t = 7 \cdot 10^2$ м/с. Свойства среды не связываются с ее геологическими (петрографическими и другими) характеристиками.

На удалении $r = 9$ м по горизонтали от пустотелой сферы на глубине $h = 2$ м установлен акустический источник (пульсирующий монополю), создающий зондирующую пульсацию — импульс давления положительной полярности: $c_t \cdot \tau \leq \lambda_R/3$ (τ — длительность зондирующего импульса, λ_R — длина волны зондирующего импульса). При этом осциллирующая масса характеризуется дебитом Q — изменением в единицу времени, зависимость которого от времени t описывается гауссовым профилем: $Q(t) = e^{-(t/\tau)^2}$. Используются импульсы длительностью τ_{imp} , [мс]: 1, 2.5, 5, что позволяет осуществлять зондирование с повышенным пространственным разрешением при меньшей длительности воздействия. Так, при τ_{imp3} пространственное разрешение по продольной волне составляет 10 м, а по поверхностной релеевской волне — 1.75 м. Поэтому для достижения максимальной точности указания местоположения малоразмерных неоднородностей целесообразно применять зондирующую посылку длительностью $\tau_{imp1} = 1$ мс, при которой разрешение по продольной волне составляет 2 м.

С помощью метода конечных элементов строится решение волнового уравнения с правой частью (3-мерный вариант) для перемещений \mathbf{u} , возбуждаемых в грунте акустическим источником:

$$-\rho(\partial^2/\partial t^2)\mathbf{u} + (\lambda + \mu)\text{grad} \cdot \text{div} \mathbf{u} + \mu \Delta \mathbf{u} = ((\partial Q(t)/\partial t)/(4\pi)) \cdot \delta(r) \cdot \delta(z-h)(\mathbf{u}/|\mathbf{u}|), \quad (1)$$

где λ, μ — константы упругости Ламе, δ — дельта функция, Δ — оператор Лапласа.

На свободных поверхностях (на горизонтальной поверхности твердого полупространства в окрестности локальной неоднородности, а также на криволинейной внутренней поверхности усеченной сферической полости) выполняются граничные условия отсутствия напряжений (см. Рис. 1). Записанные, например, в сферических

координатах, эти условия имеют следующий вид:

$$\sigma_{RR} = \sigma_{R\varphi} = \sigma_{R\theta} = 0. \quad (2)$$

Далее, в соответствии с процедурой метода конечных элементов [1, 2], получено решение уравнения (1) с учетом граничных условий (2). В результате 3-D численного моделирования вычислено текущее распределение колебаний при распространении волновых возмущений вблизи границы, а также на поверхности (над источником и заглубленной неоднородностью). Графические построения представлены в горизонтальном (x, y) и в вертикальном (x, z) сечениях.

3. Мгновенное распределение волнового импульса на свободной границе

Несколько планарных (в горизонтальной плоскости (x, y)) рельефов мгновенного распределения упругих напряжений рассчитано в фиксированные моменты времени задержки. При этом в качестве рассеивателя (неоднородности) рассматривается полусферическая выемка, то есть сфера с погружением «наполовину» — $h_1 = 1$ м (см. Рис. 1). На рисунке 2 показано кольцеобразное распределение амплитуды на фронте релеевской волны, распространяющейся по границе полупространства (применяется импульс длительностью $\tau_{imp2} = 2.5$ мс). Рельефы наглядно демонстрируют, что происходит с волновым фронтом, когда он достигает границы локальной неоднородности. На свободной поверхности также присутствует «след» от прохождения продольной волны, предшествующей релеевской (Рис. 2а). После взаимодействия релеевского импульса с неровностью в амплитудном кольцеобразном рельефе возникает разрыв фронта в месте его «контакта» с неоднородностью (Рис. 2б, в). На иллюстрациях можно видеть «дробление» рельефа, идущее по кольцу от точки касания фронта выходящей на свободную поверхность кольцевой границы выемки. Максимум уровня отклика смещается к диаметрально противоположной стороне кольца, то есть в направлении распространения падающей волны. Указанную особенность, проявляющуюся при рассеянии релеевской волны на полусферической выемке, можно рассматривать в качестве информативного признака в алгоритме диагностики при зондировании грунта и поиске на его границе локальных неоднородностей, имеющих фиксированные размеры и правильную геометрическую форму.

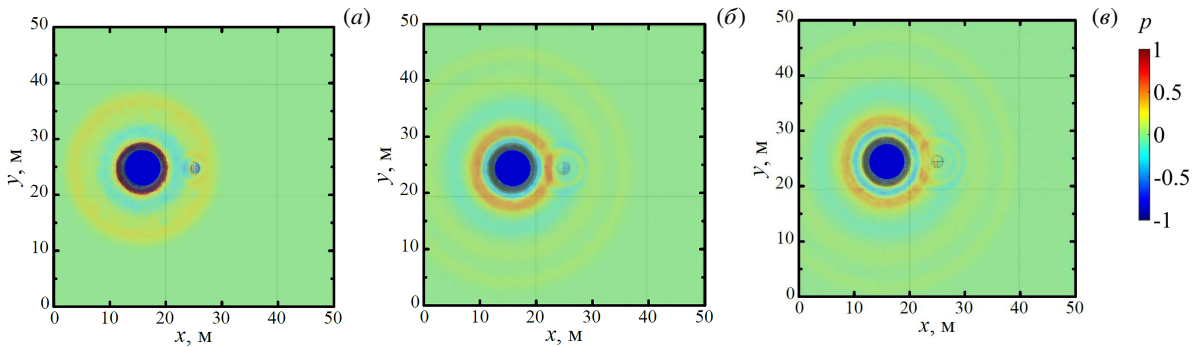


Рис. 2. Мгновенное распределение акустического давления p , нормированного на максимальную величину, в релеевской волне на плоскости (x, y) с неровностью вида пустотелой полусферы при длительности импульса $\tau_{imp2} = 2.5$ мс и разным времени задержки Δt , [мс]: 7.5 (а), 10 (б), 12.5 (в)

4. Некоторые сравнительные результаты

Для сравнения интересно обратиться к результатам, полученным в работе [11], в которой выполнен теоретический расчет поля релеевской волны, рассеянной локальной поверхностной неоднородностью, имеющей иной вид, а именно инертную массу, распределенную по кругу тонким слоем, находящимся в контакте с плоской границей полупространства. Проведенные в [11] расчеты показали, что в рассматриваемом случае преимущественным является рассеяние релеевской волны вперед, то есть в направлении, совпадающем с распространением падающей на неоднородность зондирующей волны:

$$U_z(z=0) = U_0 \frac{J_1(2\kappa R \sin(\varphi/2))}{2\kappa R \sin(\varphi/2)} (0.5 \cos \varphi + 1). \quad (3)$$

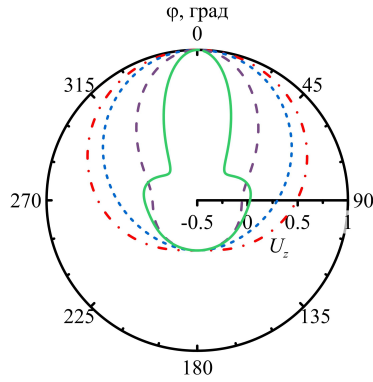


Рис. 3. Индикатриса рассеяния (угловое распределение в относительных единицах) релеевской волны при взаимодействии с границей неоднородности среды вида тонкого круглого слоя инертной массы при нарастании его радиуса κR : 0.3 (штрихпунктирная линия), 1 (пунктирная), 3 (штриховая), 7 (сплошная)

Выражение (3) описывает азимутальную направленность распределения указанной волны при вертикальной поляризации колебательного смещения \mathbf{u} , при этом U_0 — амплитуда, $J_1(2\kappa R \sin(\varphi/2))$ — функция Бесселя первого рода первого порядка, $\kappa = \omega/A_R$ — волновое число падающей релеевской волны (ω — частота колебаний источника), R — радиус круга тонкослойного покрытия (радиус неоднородности), φ — угол азимута.

Аналогичные расчеты осуществлены и для случая рассеяния гармонической волны на выемке в виде полусферы, но в настоящей работе не представлены. Далее демонстрируется важный для практического использования в инженерной сейсморазведке пример рассеяния импульса релеевской и продольной волн на локальной неровности грунта со стандартной «правильной» формой.

Наблюдаемое отличие в характере рассеяния, по сравнению с полусферической выемкой, связано с тем, что сумма фазовых полей рассеянной и падающей волн получается разная. Фазовое поле падающей волны зависит от вида неоднородности, поэтому обусловлено своеобразием воздействия на границу дополнительной нагрузки: либо «положительной» за счет колеблющейся массы (при покрытии распределенным тонким слоем), либо «отрицательной» (в случае сферической полости), создаваемой неоднородностью на поверхности. Результаты расчета, выполненного при нарастающих значениях радиуса круга, иллюстрируются графиками индикатрисы направленности рассеянной волны (см. Рис. 3).

5. Распределение волнового импульса на вертикальном разрезе в полупространстве

С точки зрения практики более интересны волновые отклики, распространяющиеся вглубь полупространства в фиксированные моменты времени задержки. В настоящей работе они получены на основе трёхмерного численного моделирования импульсного режима зондирования. На рисунке 4 представлено амплитудное распределение в вертикальном сечении (x, z) волнового импульса длительностью $\tau_{imp3} = 5$ мс при задержках по времени $\Delta t_1 = 9$ мс и $\Delta t_2 = 14$ мс. Демонстрируется распространение волнового возмущения продольных волн: прямой (идущей первой) и отраженной (идущей следом), имеющими сферические фронты. Наряду с ними приведены импульсные отклики поверхностной релеевской волны, сосредоточенные в малой области по глубине z и перемещающиеся по горизонтальной координате x вблизи свободной границы мимо усеченной сферической полости с незначительной (по сравнению с вертикальными возмущениями) скоростью. Волна бежит вдоль границы полупространства и огибает окрестность неоднородности снизу. При импульсе длительностью τ_{imp3} удастся подробно рассмотреть проход волн этого типа вблизи границы геосреды в области неоднородности. Заметно влияние, обусловленное разной глубиной погружения полости (см. Рис. 1б) под границу, на характер волнового распространения для волн обоих типов. Поэтому при моделировании использовалась средняя глубина $h_2 = 1.5$ м.

Случай зондирования импульсом укороченной длительности $\tau_{imp1} = 1$ мс представлен на рисунке 5. При времени задержки $\Delta t_1 = 9$ мс (Рис. 5а) демонстрируется неискаженный сферический фронт прямой продольной волны, а также лепестки в отраженной волне, следующей за прямой. В отраженной волне формируется многолепестковая характеристика, при этом форма фронта прямой продольной волны не испытывает искажений. Волновой рельеф прямой и догоняющей ее отраженной волн с той же длительностью импульса $\tau_{imp1} = 1$ мс, но при задержке $\Delta t_2 = 14$ мс содержит рисунок 5б. На участке фронта отраженной волны с координатами $X > X_{source}$ имеет место гашение волны, при котором в отраженной волне наблюдается «расщепление» по

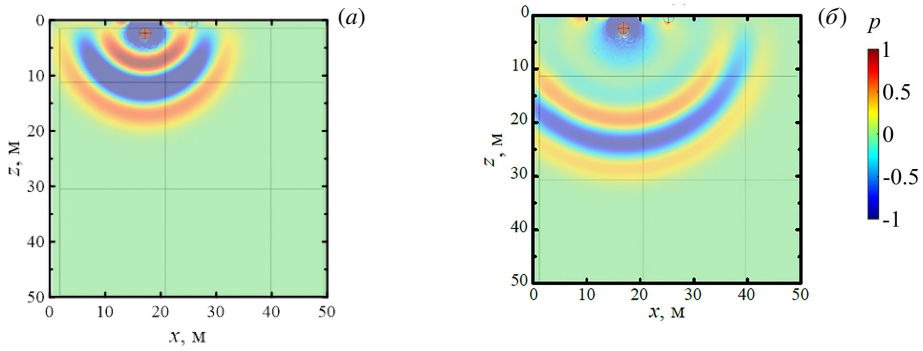


Рис. 4. Фронты продольной волны и отклика релеевской волны в сечении (x, z) при длительности импульса $\tau_{imp3} = 5$ мс и разным времени задержки: $\Delta t_1 = 9$ мс (а), $\Delta t_2 = 14$ мс (б)

ширине с возникновением на фронте структуры с локальными провалами уровня (амплитуды). Последнее обусловлено проявлением вышеупомянутой лепестковой характеристики отраженной волны.

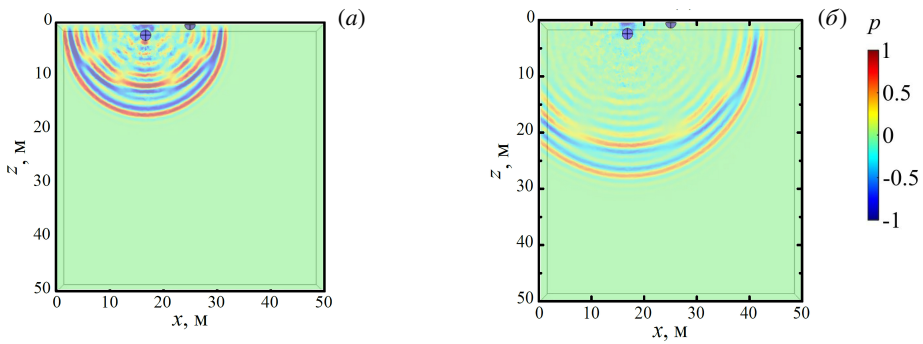


Рис. 5. Фронт прямой продольной волны и лепестки отраженной волны в сечении (x, z) при длительности импульса $\tau_{imp1} = 1$ мс и разных временах задержки: $\Delta t_1 = 9$ мс (а), $\Delta t_2 = 14$ мс (б)

При времени задержки $\Delta t_3 = 22$ мс построены волновые фронты для разных длительностей импульса $\tau_{imp1} = 5$ мс (Рис. 6а) и $\tau_{imp3} = 5$ мс (Рис. 6б). Видно, что при большей длительности импульса достигается большая рельефность в изображении интерференционного максимума в цуге волн при пересечении фронтов отраженной и рассеянной волн. Области пересечения с максимальными откликами уровня или с искажениями формы фронта $X < X_{source}$ отмечены кружками.

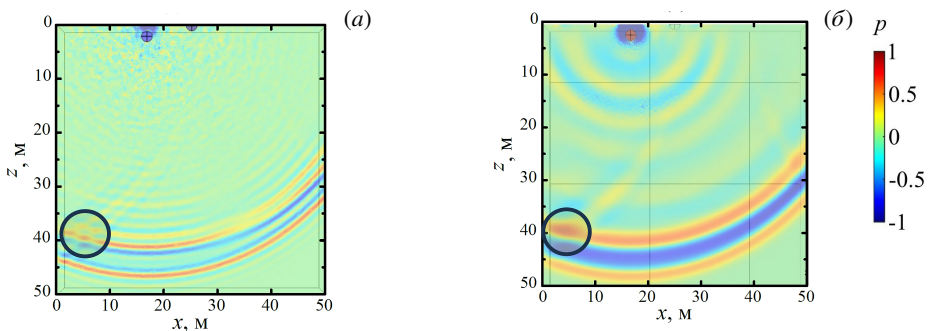


Рис. 6. Фронты прямой продольной и отраженной волн и области их пересечения (взяты в кружок) в сечении (x, z) при времени задержки $\Delta t_3 = 22$ мс и разных длительностях импульса: $\tau_{imp1} = 1$ мс (а), $\tau_{imp3} = 5$ мс (б)

Для адекватной интерпретации результатов численного моделирования волн в импульсном режиме на рисунке 7 представлена поясняющая лучевая схема с соблюдением пространственно-временных масштабов (с учетом скорости и путей распространения продольных волн). При этом имеет место удовлетворительное

двумерных рельефов демонстрируются кольцеобразные фронты волновых импульсов поверхностной волны и объемной продольной волны (прямой и отраженной). Установлены признаки рассеяния на неоднородности волн указанного типа, позволяющие диагностировать наличие пустотелой усеченной сферической полости как вблизи, так и на свободной границе геосреды. К числу признаков в рельефе сигналов относятся интерференционные максимумы на пересечении фронта отраженной и рассеянной продольной волн в вертикальном сечении (x, z) , а также модуляция по амплитуде — «дробление», идущее по кольцу фронта рассеянной релеевской волны в горизонтальном сечении (x, y) .

Установленные особенности могут стать основой для формулирования алгоритма, выявления присутствия локальной одиночной неоднородности (неровности) на границе упругого полупространства и диагностирования ее геометрических параметров. Устройство для диагностики (дефектоскоп) может состоять из сейсмического излучателя и нескольких приемных решеток, размещаемых на разных участках поверхности грунта в зондируемой окрестности. Регистрация информативных (целевых) сигналов осуществима с разных потенциально возможных направлений прихода рассеянных волн.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИПФ РАН (проект № FFUF-2024-0041).

Литература

1. Жостков Р.А. Восстановление неоднородностей среды при микросейсмическом зондировании вдоль криволинейной поверхности // Акустический журнал. 2019. Т. 65, № 5. С. 708–720. DOI: 10.1134/S0320791919050204.
2. Власов С.Н., Павлова Г.Д., Журавлев А.Н., Власова В.Н. Исследование отражения релеевских волн от подповерхностных дефектов // Современные научные исследования: актуальные вопросы, достижения и инновации: сб. статей XIX Международной научно-практической конференции в 3 частях, Пенза, 5 июня 2021 г. Т. 1. Пенза: Наука и Просвещение, 2021. С. 109–111.
3. Викторов И.А. Физические основы применения ультразвуковых волн Рэлея и Лэмба в технике. М.: Наука, 1966. 168 с.
4. Аббакумов К.А., Коновалов Р.С. О рассеянии поверхностных волн Рэлея трещинноподобным дефектом, нормальным к поверхности упругого полупространства // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2012. № 1. С. 74–80.
5. Разин А.В. Рассеяние поверхностной акустической волны на неоднородности малых размеров в твердом полупространстве // Известия вузов. Радиофизика. 2010. Т. 53, № 7. С. 464–480.
6. Самедов Я.Ю., Кутянин В.В. Поля рассеяния волны Рэлея поверхностными дефектами // В мире неразрушающего контроля. 2008. № 1. С. 34–35.
7. Заславский Ю.М. Параметрическое рассеяние высокочастотных упругих волн на сферической полости малых волновых размеров, колеблющейся в поле релеевской волны // Акустический журнал. 2004. Т. 50, № 1. С. 55–60.
8. Ермолов И.Н. Достижения в теоретических вопросах ультразвуковой дефектоскопии, задачи и перспективы // Дефектоскопия. 2004. № 10. С. 13–48.
9. Чуков В.Н. Рассеяние волны Рэлея статистической неоднородностью плотности массы // Физика твердого тела. 1997. Т. 39, № 2. С. 267–274.
10. Косачев В.В., Лохов Ю.Н., Чуков В.Н. Рассеяние поверхностных релеевских и объемных акустических волн на двумерной статистической шероховатости свободной поверхности твердого тела // Физика твердого тела. 1990. Т. 32, № 7. С. 2045–2055.
11. Заславский Ю.М. Энергетика рассеянных упругих полей, возникающих при дифракции волны Рэлея на поверхностном возмущении полуграниченной среды. Препринт № 267. Горький: НИРФИ, 1989. 15 с.
12. Angel Y.C., Achenbach J.D. Reflection and transmission of obliquely incident Rayleigh waves by a surface-breaking crack // The Journal of the Acoustical Society of America. 1984. Vol. 75, no. 2. P. 313–319. DOI: 10.1121/1.390473.
13. Hirao M., Fukuoka H., Miura Y. Scattering of Rayleigh surface waves by edge cracks: Numerical simulation and experiment // The Journal of the Acoustical Society of America. 1982. Vol. 72, no. 2. P. 602–606. DOI: 10.1121/1.388041.
14. Крылов В.В. Оптическая теорема для рассеяния волн деформации на неоднородностях плоской границы твердого тела // Акустический журнал. 1980. Т. 26, № 2. С. 214–217.
15. Parekh J.P., Tuan H.-S. Reflection and bulk-wave conversion of Rayleigh wave at a single shallow groove // Journal of Applied Physics. 1977. Vol. 48, no. 3. P. 994–1003. DOI: 10.1063/1.323721.
16. Maradudin A., Mills D. The attenuation of Rayleigh surface waves by surface roughness // Annals of Physics. 1976. Vol. 100, no. 1/2. P. 262–309. DOI: 10.1016/0003-4916(76)90063-4.

17. *Tian H.-S.* On bulk waves excited at a groove by Rayleigh waves // *Journal of Applied Physics*. 1975. Vol. 46, no. 1. P. 36–41. DOI: 10.1063/1.321345.

Сведения об авторах:

Заславский Юрий Михайлович, дфмн, внс, Институт прикладной физики РАН (ИПФ РАН), 603950, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, д. 46; e-mail: zaslav@ipfran.ru; ORCID: 0009-0006-5297-858X

Заславский Владислав Юрьевич, кфмн, снс, ИПФ РАН; e-mail: zas-vladislav@ipfran.ru; ORCID: 0000-0003-2417-645X