

КОНФЕРЕНЦИИ И СИМПОЗИУМЫ

**Объединенная научная сессия
Отделения физических наук Российской академии наук
и Объединенного физического общества Российской Федерации
"Нелинейная акустическая диагностика"**

(28 сентября 2005 г.)

28 сентября 2005 г. в конференц-зале Физического института им. П.Н. Лебедева РАН состоялась Объединенная научная сессия Отделения физических наук Российской академии наук и Объединенного физического общества Российской Федерации "Нелинейная акустическая диагностика". На сессии были заслушаны доклады:

1. **Руденко О.В.** (Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова). *Гигантские нелинейности структурно неоднородных сред и основы методов нелинейной акустической диагностики.*

2. **Зайцев В.Ю., Назаров В.Е., Таланов В.И.** (Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород). *"Неклассические" проявления микроструктурно-обусловленной нелинейности: новые возможности для акустической диагностики.*

3. **Есипов И.Б., Рыбак С.А., Серебряный А.Н.** (Акустический институт им. Н.Н. Андреева РАН). *Нелинейная акустическая диагностика земных пород и океана.*

4. **Преображенский В.Л.** (Научный центр волновых исследований Института общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Объединенная европейская лаборатория нелинейной магнитоакустики конденсированных сред (ЛЕМАС)). *Волны с параметрически обращенным фронтом: применение в нелинейной акустоскопии и диагностике.*

Доклад О.В. Руденко в расширенном виде публикуется в этом номере журнала в разделе "Физика наших дней". Краткое содержание докладов 2–4 публикуется ниже.

PACS numbers: 43.25.+y, 62.20.Mk, 62.65.+k

"Неклассические" проявления микроструктурно-обусловленной нелинейности: новые возможности для акустической диагностики

В.Ю. Зайцев, В.Е. Назаров, В.И. Таланов

1. "Классическая" решеточная и микроструктурно-порожденная акустическая нелинейность

В физике твердого тела отклонения от линейно-упругого поведения традиционно связывают с проявлением слабого ангармонизма межатомного потенциала [1]. Для описания нелинейности такого происхождения обычно достаточно к линейному слагаемому в законе Гука добавить квадратичные и кубичные по компонентам тензора деформации слагаемые: $\sigma = E(\varepsilon + \gamma^{(2)}\varepsilon^2 + \gamma^{(3)}\varepsilon^3 + \dots)$, где σ — упругое напряжение, ε — деформация, E — модуль упругости (чтобы не загромождать рассмотрение второстепенными деталями, мы ограничились случаем продольных деформаций). Характерные величины безразмерных квадратичного и кубического коэффициентов нелинейности $\gamma^{(2)}$ и $\gamma^{(3)}$ для однородных аморфных материалов и монокристаллов обычно лежат в диапазоне нескольких единиц, а характерные величины деформаций, как правило, весьма малы (например $\varepsilon < 10^{-5}$ даже при интенсивных акустических нагрузках и $\varepsilon < 10^{-3}$ при "обычных" механических). Таким образом, нелинейные поправки по сравнению с линейным слагаемым обычно очень малы, хотя именно их наличием обусловлены такие известные явления, как тепловое расширение и зависимость скорости упругих волн от механического напряжения и температуры. Оценки величин коэффициентов нелинейности по таким эффектам достаточно хорошо согласуются с представлениями о форме межатомного потенциала и его слабой ангармоничности [1]. Вместе с тем для основанных на той

же форме потенциала теоретических оценок напряжений, соответствующих порогу разрушения, еще в 20-е годы прошлого века было обнаружено сильное (на 2–4 порядка) расхождение с данными экспериментов. Изучение причин такого расхождения привело к пониманию важности роли микроструктурных дефектов и внесло существенный вклад в формирование большого самостоятельного направления исследований — физики дислокаций.

Такую крайнюю форму нелинейного поведения материала, как разрушение, при всей его чрезвычайно высокой чувствительности к наличию дефектов микроструктуры, естественно, невозможно использовать в диагностических целях. Оказывается, однако, что даже в акустическом диапазоне амплитуд (на несколько порядков ниже деформаций, вызывающих разрушение) наличие микродефектов уже может ярко проявляться в модификации нелинейных свойств среды. Так, в 1970-х гг. были получены первые экспериментальные свидетельства того, что в процессе накопления усталостных повреждений изменение микроструктуры металла может проявляться в многократном росте уровня его акустической нелинейности (что приводит, например, к значительному увеличению амплитуды высших гармоник акустической волны [2–4]). Позднее было установлено, что в отличие от проявлений "классической" степенной упругой нелинейности при этом часто имеет место качественная модификация нелинейных эффектов (может изменяться характер амплитудных зависимостей, появляются нелинейно-диссипативные свойства, гистерезис и т.д.). Данные такого рода накоплены для очень широкого класса сред: металлов с усталостными или термическими повреждениями структуры, горных пород, многих искусственных материалов (в том числе композитных) с трещиноподобными дефектами и расслоениями или межзеренными контактами [2–12], нанокристаллических металлов [13], зернистых сред [14].

С точки зрения возможного диагностического использования нелинейных акустических эффектов особенно важен тот факт, что высокая "структурная чувствительность" акустической нелинейности (как ее уровня, так и качественного характера) часто наблюдается уже на самой начальной стадии повреждения материала при еще почти неизменных величинах линейных упругих модулей. На этой стадии традиционные линейные методы, основанные, например, на наблюдении изменчивости скоростей упругих волн (или эквивалентных им изменений собственных частот исследуемого образца) еще не могут дать определенного результата.

2. Почему изменчивость именно нелинейных акустических свойств столь высока?

Ввиду многообразия типов микроструктурных неоднородностей-дефектов и обширности класса сред, демонстрирующих аномальную (и количественно, и качественно) акустическую нелинейность, довольно естественным представляется, что сами механизмы ее происхождения также чрезвычайно разнообразны, а потому конкретные физические модели нелинейных свойств должны быть очень индивидуальными и, следовательно, иметь предсказательную силу в слишком узких областях. С другой стороны, альтернативное чисто феноменологическое описание макроскопической связи напряжение–деформация, основанное на сравнении с

экспериментом, хотя и обеспечивает большую общность, но не дает возможности судить о связи нелинейных свойств среды с особенностями ее микроструктуры. Поэтому возникает потребность в моделях, которые, сохраняя предсказательную способность, обеспечивали бы разумный компромисс между отмеченными крайними случаями.

Анализируя полученные разными группами многочисленные данные по наблюдениям микроструктурно-обусловленной акустической нелинейности (отбрасывая экзотические случаи взаимодействия акустической моды с другой неакустической сильно нелинейной модой, связанной, например, с электронной или спиновой подсистемой), оказалось возможным сформулировать следующее достаточно общее утверждение. Причиной сильного возрастания акустической нелинейности микро неоднородных сред в большинстве случаев является наличие в структуре среды компонент с резко контрастирующими линейными упругими свойствами, причем размер мягких включений-дефектов мал по сравнению с длиной упругой волны, а также мала концентрация этих включений (критерий малости сформулирован ниже). Характерным примером таких контрастно-мягких дефектов являются, например, трещины, для которых различные известные модели согласованно предсказывают, что трещина может быть полностью закрыта сжимающим напряжением, создающим в окружающем материале среднюю деформацию, примерно равную отношению величины раскрытия трещины d к ее диаметру L . Это фактически означает, что трещина примерно в L/d раз мягче окружающего материала-матрицы. Типичные для трещин значения отношения d/L часто весьма малы, 10^{-3} – 10^{-5} . Другим характерным примером являются межзеренные контакты, которые вследствие своей геометрии (малой площади касания) во много раз более сжимаемы, чем материал в объеме зерен. Скопления дислокаций на границах зерен поликристаллов также значительно более податливы (прежде всего по отношению к тангенциальным нагрузкам), чем окружающие области, состоящие из более однородного материала.

Отразить отмеченные выше особенности удастся, не конкретизируя детально тип дефектов, в рамках довольно простой реологической модели микро неоднородной среды с контрастно-мягкими включениями [15, 16], которая даже в одномерном варианте позволяет получить ряд нетривиальных выводов. В основе модели лежит вполне очевидное утверждение, что, в силу высокой сжимаемости, а следовательно, локально повышенных деформации и скорости деформации, именно на этих дефектах-включениях локализованы как нелинейность (наибольшие отклонения от закона Гука), так и повышенная диссипация. Однородную среду-матрицу, окружающую дефекты, при этом можно рассматривать как линейно упругий материал, описываемый законом Гука $\sigma = E\varepsilon$. Такая модель микро неоднородной среды схематически показана на рис. 1. Важнейшими параметрами дефектов в этой модели является их относительная (по сравнению с модулем упругости E среды-матрицы) податливость, характеризующаяся малым параметром $\zeta \ll 1$, а также концентрация ν , т.е. линейная концентрация мягких включений в одномерном случае либо их объемная доля при обобщении модели на трехмерный случай. Размер дефекта считаем много меньшим длины

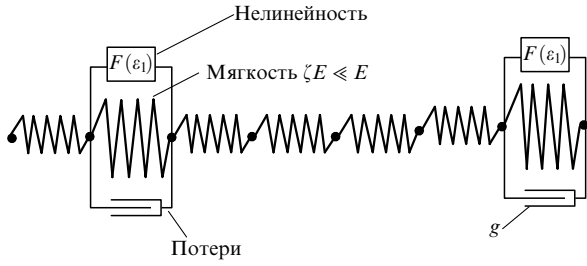


Рис. 1. Реологическая модель среды, содержащей контрастно-мягкие дефекты-включения, на которых локализованы нелинейность и диссипация.

упругой волны, а сам дефект предполагается вязкоупругим и слабо нелинейным, если его деформацию (которую необходимо отличать от средней деформации среды) измерять в собственном масштабе дефекта. Уравнение состояния, учитывающее такие свойства отдельных дефектов с параметром мягкости ζ , имеет вид

$$\sigma = \zeta E [\varepsilon_1 + F(\varepsilon_1)] + g \frac{d\varepsilon_1}{dt}. \quad (1)$$

Коэффициент g характеризует эффективную вязкость дефектов, а функция $F(\varepsilon_1)$ описывает их нелинейность. Например, для квадратично-нелинейных дефектов $F(\varepsilon_1) = \gamma \varepsilon_1^2$, причем параметр γ , характеризующий нелинейность дефекта в масштабе его собственной (локальной) деформации ε_1 , имеет "обычную" величину порядка нескольких единиц. В рамках такой модели микронеоднородной среды в приближении малой концентрации одинаковых мягких включений получаем [16] следующее соотношение между упругим напряжением и средней (макроскопической) деформацией материала:

$$\begin{aligned} \sigma(\varepsilon) = E\varepsilon - E\nu\Omega \int_{-\infty}^t \varepsilon(\tau) \exp[-\zeta\Omega(t-\tau)] d\tau + \\ + \nu E\Omega\zeta \int_{-\infty}^t \exp[-\zeta\Omega(t-\tau)] \times \\ \times F \left\{ \Omega \int_{-\infty}^{\tau} \varepsilon(\tau') \exp[-\zeta\Omega(\tau-\tau')] d\tau' \right\} d\tau. \quad (2) \end{aligned}$$

Здесь использовано обозначение $\Omega = E/g$, так что $\zeta\Omega$ имеет смысл релаксационной частоты дефекта, причем в случае различных дефектов это уравнение следует дополнить усреднением по их свойствам, т.е. по распределению $\nu(\zeta, g)$. Первое слагаемое в правой части уравнения (2) обязано своим происхождением линейной среде-матрице, второе учитывает привносимые дефектами линейные уменьшение упругого модуля и диссипацию. Третье, нелинейное, слагаемое учитывает совместное влияние нелинейных и релаксационных свойств дефектов. Это слагаемое демонстрирует сущность механизма сильного возрастания уровня нелинейности среды за счет повышенных деформаций на контрастно-мягких включениях, что особенно хорошо видно в квазистатическом пределе. В таком случае, например для степенной нелинейности дефектов $F(\varepsilon_1) = \gamma^{(n)} \varepsilon_1^{(n)}$, макроскопическая связь напряжение – деформация принимает следующую простую форму (справедливая при $0 \leq \nu \leq 1$) [15]:

$$\sigma = \varepsilon E_{\text{eff}} (1 + \varepsilon^{n-1} \gamma_{\text{eff}}^{(n)}),$$

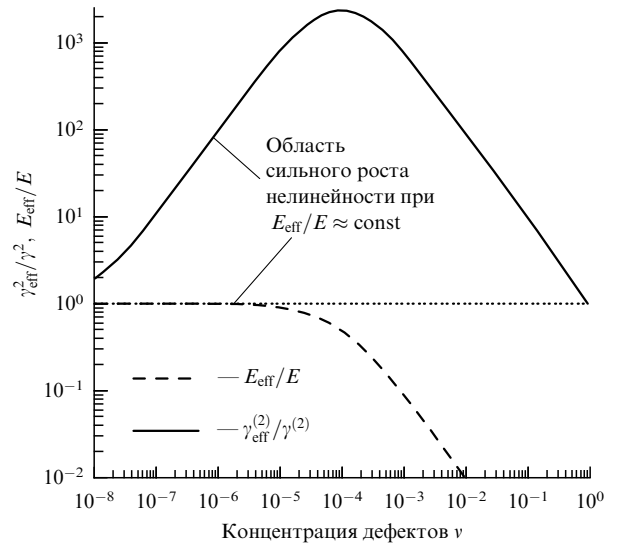


Рис. 2. Относительные изменения модуля упругости E_{eff}/E и параметра квадратичной нелинейности $\gamma_{\text{eff}}^{(2)}/\gamma^{(2)}$ микронеоднородной среды, содержащей дефекты с типичным для трещин показателем относительной мягкости $\zeta = 10^{-4}$.

где

$$\frac{E_{\text{eff}}}{E} = \frac{1}{1 - \nu + \nu/\zeta}, \quad \frac{\gamma_{\text{eff}}^{(n)}}{\gamma^{(n)}} = \frac{1 - \nu + \nu/\zeta^n}{(1 - \nu + \nu/\zeta)^n}. \quad (3)$$

Из этих соотношений следует (рис. 2), что локальное повышение деформации на мягких дефектах (связанное с их показателем относительной мягкости $\zeta \ll 1$) гораздо сильнее проявляется в возрастании нелинейных членов в уравнении состояния, нежели в уменьшении линейного модуля упругости. Для данного показателя мягкости дефектов ζ существует область значений их очень малых концентраций $\nu < \zeta \ll 1$, в которой линейный модуль остается практически неизменным, тогда как нелинейный параметр материала уже многократно возрастает (см. рис. 2). Именно в этой области малых концентраций, где чувствительность линейных методов еще недостаточна для получения определенного результата, и представляет основной интерес использование нелинейных эффектов с целью раннего обнаружения "слабых мест" в материале (в первую очередь областей зарождения трещин). Интересно подчеркнуть, что увеличение коэффициентов нелинейности $\gamma_{\text{eff}}^{(n)}/\gamma^{(n)}$ разных порядков в зависимости от концентрации дефектов ν демонстрирует четко выраженный максимум $\gamma_{\text{eff}}^{(n)}/\gamma^{(n)} = [(n-1)/\zeta]^{n-1}/n^n \gg 1$, причем, чем выше порядок нелинейности, тем при меньшей концентрации дефектов $\nu_{\text{opt}} \approx \zeta/(n-1) \ll 1$ достигается этот максимум и тем выше его величина. Такое немонотонное возрастание физически обусловлено "игрой" между фактором локального повышения деформации на мягких включениях и величиной их объемного содержания (концентрацией). Аналогичное явление известно и в акустике газожидкостных смесей, демонстрирующих яркий пример "контрастного" механизма возрастания нелинейности, в то время как чистые жидкость и газ являются классическими слабонелинейными средами [17].

3. Качественные "неклассические" особенности микроструктурно-обусловленной нелинейности

В случае твердого тела обсуждаемые "мягкие включения", кроме собственно высокой мягкости, обладают еще рядом особенностей, приводящих к нетривиальным следствиям. Например, дефекты типа трещин и микроконтактов часто проявляют одновременно и релаксационные, и специфические нелинейные свойства. В частности, герцевские контакты демонстрируют дробный степенной показатель нелинейности $3/2$ по отношению к напряжению сжатия и одновременно проявляют диодоподобное поведение, так как не "держат" растягивающее напряжение [14]. Кроме того, за счет фрикционных и адгезионных явлений те же самые дефекты могут приводить к проявлению гистерезисных свойств материала [5–7].

Сочетание этих особенностей обуславливает широкое разнообразие "неклассических" проявлений микроструктурно-обусловленной нелинейности. Например, даже упрощенное уравнение (2) показывает, что для вполне обычного, в частности упруго-квадратичного, описываемого функцией $F(\varepsilon_1) = \gamma\varepsilon_1^2$, характера нелинейности дефекта влияние релаксационных свойств приводит к выраженной частотной зависимости эффективных нелинейных параметров, что не характерно для обычной решеточной нелинейности. Действительно, в случае микронеоднородной среды традиционный интуитивный подход, предполагающий возможность аддитивного учета нелинейности и релаксации, не работает. Аддитивный подход становится неправомерен, поскольку и нелинейные, и релаксационные свойства микронеоднородной среды физически локализованы в основном в одних и тех же местах — на мягких дефектах, так что релаксационное "замораживание" реакции дефектов на акустическое воздействие на частотах, намного превышающих релаксационную частоту $\zeta\Omega$, одновременно ослабляет и их нелинейный отклик. В результате при наблюдении, например, обычного эффекта смещения частот эффективные значения квадратичного нелинейного параметра могут оказаться существенно ниже для суммарной гармоники, чем для гармоники на разностной частоте.

Другое нетривиальное проявление такой "контрастной" микронеоднородности среды, которое также следует из уравнения (2), — это возможность сильного (в несколько раз) изменения уровня диссипации (декремента) микронеоднородного материала при умеренных статических и динамических (скажем, акустических с $\varepsilon \sim 10^{-5}$) деформациях в результате комбинированного действия линейного релаксационного поглощения и чисто упругой нелинейности $F(\varepsilon_1)$ [18]. Важно, что при столь сильных изменениях диссипации сопутствующие изменения линейного модуля упругости могут оставаться еще очень малыми — порядка 1%. Действительно, в случае микронеоднородной среды почти вся диссипация локализована на мягких дефектах (например трещинах), которые при малой концентрации слабо влияют на макроскопический модуль упругости. Таким образом, даже полное закрытие таких трещин сжимающим напряжением может лишь незначительно изменить упругость среды, в то время как для поглощения *относительное* изменение может быть сколь угодно большим (от конечной величины декремента до нуля). В однородной среде (когда справедливы классические

реологические модели вязкоупругого поведения типа модели Кельвина–Фойгта) такого резкого различия быть не может.

Не имея возможности детальнее обсудить эти и другие интересные следствия реологической модели микронеоднородной среды [15, 16], отметим, что получаемые на ее основе выводы подкрепляются непосредственным анализом нелинейных и термоупругих свойств герцевских микроконтактов в трещинах [11, 12]. Этот анализ предсказывает, во-первых, многократное повышение уровня термоупругих потерь (на 4–6 порядков по сравнению с обычно обсуждаемым в геофизике вкладом термоупругости) и, во-вторых, объясняет высокую чувствительность этих потерь к очень умеренной средней деформации в среде. Действительно, внутренние контакты могут оказаться существенно возмущенными при типичных акустических деформациях $\varepsilon \sim 10^{-7} - 10^{-5}$, гораздо меньших значений $\varepsilon \sim 10^{-4} - 10^{-3}$, необходимых для полного закрытия (открытия) трещины.

4. Экспериментальные примеры

Одним из первых ярких примеров использования высокой чувствительности акустической нелинейности к появлению микроструктурных дефектов явилась демонстрация возможности контроля качества клеевого соединения плиток термозащитного покрытия советского космического челнока "Буран". Такой контроль был основан на эффекте повышения уровня второй гармоники при локальном вибровоздействии в области отслоения [19]. Ввиду высокого поглощения в материале плиток в этом случае не могла быть применена стандартная высокочастотная ультразвуковая дефектоскопия.

Во многих случаях, однако, более удобным оказывается не наблюдение высших гармоник (что требует высокой линейности возбуждения), а использование модуляционного взаимодействия пробной волны и более мощного независимо возбуждаемого возмущения (в том числе импульсного). Пример обнаружения таким

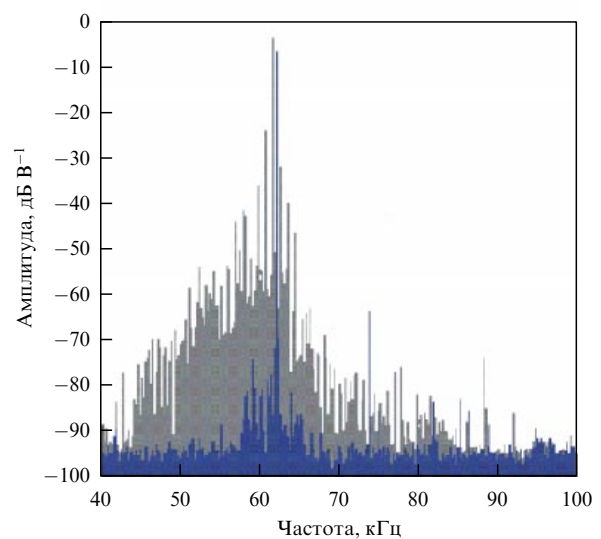


Рис. 3. Нелинейно-модуляционная диагностика микротрещин в осях железнодорожных колесных пар. Более темный цвет соответствует спектру модуляции для оси без дефекта, менее темный цвет — спектру модуляции для оси с одиночной трещиной. Контраст уровней модуляции составляет более 45 дБ.

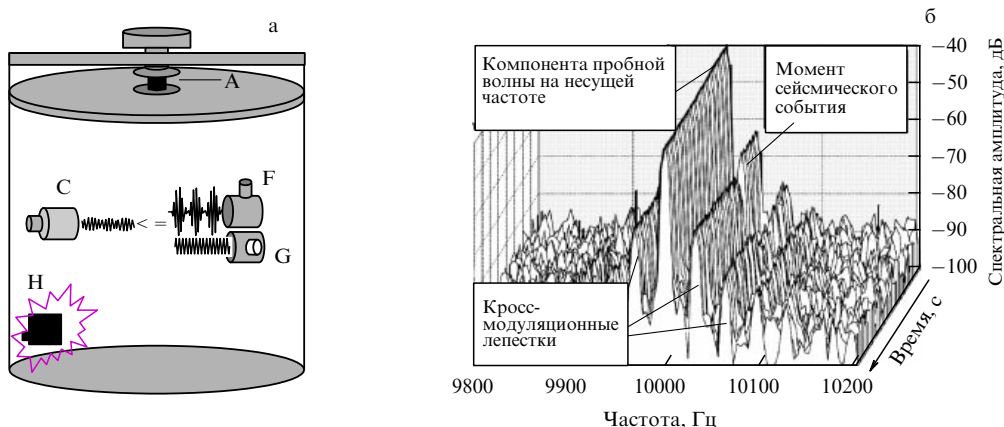


Рис. 4. (а) Схема экспериментальной установки для наблюдения акустического аналога люксембург-горьковского эффекта: А — тензодатчик, С — приемный пьезопреобразователь, F — излучатель модулированной волны накачки, G — излучатель пробной синусоидальной волны, H — виброисточник ударных импульсов. (б) Пример сильных (10–15 дБ) вариаций наведенных "накачкой" кроссмодуляционных компонент пробной волны под действием "сейсмических событий" — ударных импульсов в искусственной зернистой среде (сопутствующие возмущения спектральной компоненты на основной несущей частоте практически незаметны) [21].

методом одиночной трещины размером несколько миллиметров в оси железнодорожной колесной пары [20] приведен на рис. 3 (модуляция пробной ультразвуковой волны производилась ударно-возбуждаемыми колебаниями на собственных частотах образцов).

Наряду с таким обычным типом модуляционного взаимодействия, характерная для микронеоднородных сред выраженная амплитудная зависимость поглощения (практически отсутствующая для однородных материалов) открывает возможность использования в диагностических целях кроссмодуляционного эффекта переноса амплитудной модуляции с одной несущей волны ("накачки") на другую изначально немодулированную пробную волну. Этот эффект является прямым акустическим аналогом известного так называемого люксембург-горьковского эффекта, проявляющегося при взаимодействии радиоволн в ионосфере. Пример использования наблюдения вариаций кроссмодуляционного спектра для мониторинга структурных перестроек зернистой среды (вызванных модельными слабыми "сейсмическими событиями" в лабораторном эксперименте [21]) показан на рис. 4. В эксперименте амплитудная модуляция (30 Гц) переносилась с несущей "накачки" (7 кГц) на пробную волну (10 кГц).

Успешные натурные наблюдения модуляции пробной сейсмической волны другим полем деформаций [22, 23], а также эффектов самовоздействия [24] при типичных для существующих сейсмоисточников [22–25] амплитудах подтверждают перспективность использования подобных нелинейных эффектов не только в неразрушающем контроле, но и сейсмическом мониторинге (по крайней мере в инженерной сейсмике на дистанциях до нескольких сотен метров). Так, на рис. 5 приведен пример изменения фазы сейсмической волны (дистанция распространения 120 м в песчано-глинистой породе) в зависимости от амплитуды возбуждения [24]. На рисунке 6 показан другой пример натуральных наблюдений [23] — амплитудно-фазовая модуляция сейсмоакустической волны, создаваемой мощным внутрискважинным источником [25], в поле деформаций, вызванных лунно-солнечными приливами.

Ряд других примеров "неклассических" проявлений микроструктурно-обусловленной нелинейности (в том

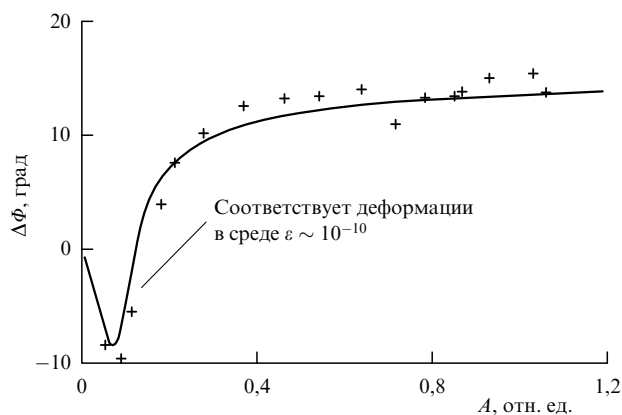


Рис. 5. Фазовое самовоздействие сейсмоакустической волны, создаваемой высококогерентным источником (частота 230 Гц), наблюдавшееся при рекордно малых амплитудах — экспериментальные точки и результаты модельного расчета [24].

числе недавно обнаруженный для трещин эффект обратимой по времени медленной динамики термоупругого происхождения, наблюдения комбинированных медленных и "мгновенных" нелинейных эффектов, применение нелинейных эффектов для оценки функции распределения контактных сил в гранулированных средах в недоступной другим методам области значений, много меньших среднего значения и т.д.) приводится в [11, 12, 14, 21, 26]. Здесь мы ограничимся только примером (рис. 7) наблюдения для одиночной трещины логарифмической по времени, при этом обратимой и симметричной по скорости медленной динамики, определяемой термоупругим механизмом [12, 26].

Приведенные результаты и аналогичные данные других авторов подтверждают высокую перспективность использования нелинейных акустических эффектов для широкого круга задач материаловедения, неразрушающего контроля и сейсмического мониторинга, что объясняет быстро растущий в мире интерес к этому кругу проблем.

Отметим в заключение, что краткий обзор цикла исследований ИПФ РАН, представленный в этом док-

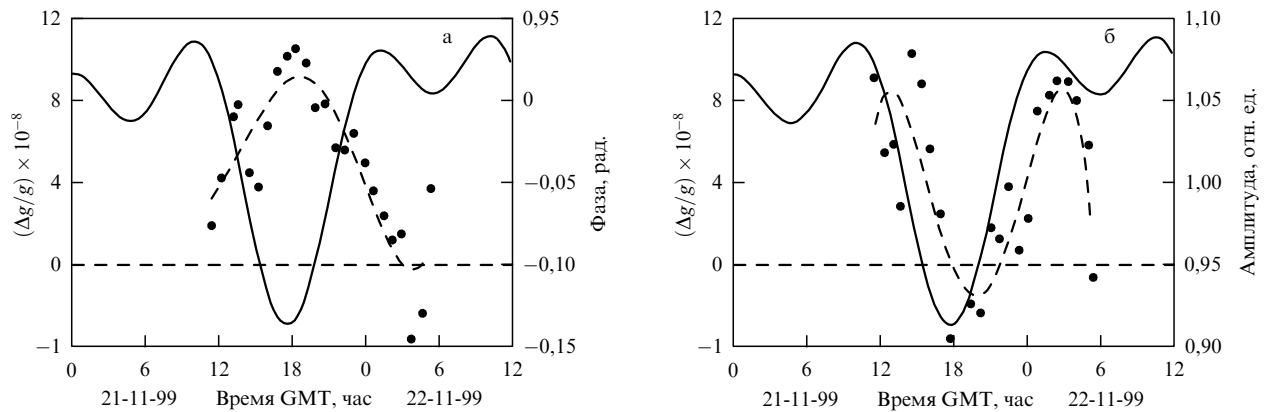


Рис. 6. Временные зависимости амплитуды (а) и фазы (б) сейсмоакустической волны, распространяющейся в массиве нефтегазонасыщенного песчаника (частота 167 Гц, дистанция распространения 360 м). Штриховые кривые — аппроксимация экспериментальных точек; сплошные — изменения относительного ускорения силы тяжести, вызванного лунно-солнечным приливом [23].

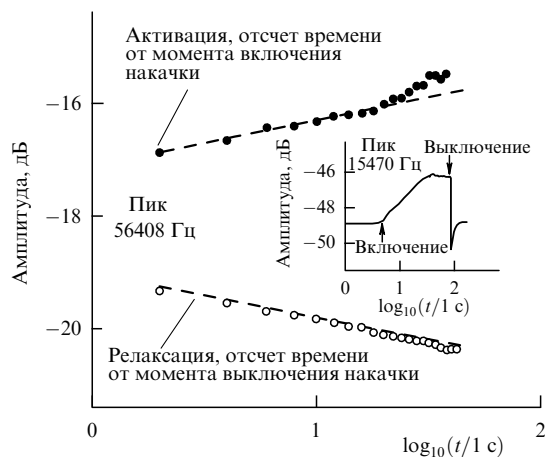


Рис. 7. Пример медленной динамики амплитуд (добротностей) двух пробных резонансов в стальном образце с одиночной трещиной в процессе акустической "накачки" образца другой волной и последующей после ее выключения релаксацией. На вставке отсчет времени непрерывен, а моменты времени включения (выключения) волны накачки отмечены стрелками [26].

ладе, во многом был инициирован пионерскими работами по нелинейной акустике, проводившимися с 1960–1970 гг. под руководством В.А. Зверева и Л.А. Островского.

Представленные результаты получены при частичной поддержке РФФИ (гранты 05-05-64941 и 05-02-17355), Минпромнауки (грант НШ-1641.2003.02), программы ОФН РАН "Когерентные акустические поля и сигналы" и совместной программы РАН и Национального центра научных исследований Франции (проект PESCO-NEI No. 16366).

Список литературы

1. Киттель Ч *Введение в физику твердого тела* (М.: Наука, 1978)
2. Гедройц А А, Зарембо Л К, Красильников В А *ДАН СССР* **150** 515 (1963)
3. Гиц И Д, Гушин В В, Конохов Б А *Акуст. журн.* **19** 335 (1973)
4. Buck R O, Morris W L, Richardson J M *Appl. Phys. Lett.* **33** 371 (1978)
5. Nazarov V E et al. *Phys. Earth Planet. Inter.* **50** 65 (1988)
6. Назаров В Е *Акуст. журн.* **37** 150 (1991)
7. Guyer R A, Johnson R A *Phys. Today* **52** (4) 30 (1999)

8. Nazarov V E, Kolpakov A B *J. Acoust. Soc. Am.* **107** 1915 (2000)
9. Van Den Abeele K E-A *NDT&E Int.* **34** 239 (2001)
10. Ostrovsky L A, Johnson P A *Riv. Nuovo Chimento* **24** (7) 1 (2001)
11. Zaitsev V, Gusev V, Castagnede B *Phys. Rev. Lett.* **89** 105502 (2002)
12. Zaitsev V, Gusev V, Castagnede B *Phys. Rev. Lett.* **90** 075501 (2003)
13. Lang M J et al. *Nanostruct. Mater.* **12** 811 (1999)
14. Tournat V et al. *Phys. Rev. Lett.* **92** 085502 (2004)
15. Zaitsev V Yu *Acoust. Lett.* **19** 171 (1996)
16. Зайцев В Ю, Назаров В Е, Беляева И Ю *Акуст. журн.* **47** 220 (2001)
17. Руденко О В, Солуян С И *Теоретические основы нелинейной акустики* (М.: Наука, 1975)
18. Zaitsev V, Sas P *Acta Acust. Acust.* **86** 429 (2000)
19. Антонец В А, Донской Д М, Сутин А М *Механика композит. матер.* (5) 934 (1986)
20. Матвеев А Л и др. *В мире неразруш. контр.* (4(26)) 65 (2004)
21. Zaitsev V Yu et al. *Europhys. Lett.* **70** 607 (2005)
22. Багмет А Л и др. *Докл. РАН* **346** 390 (1996)
23. Боголюбов Б Н и др. *Геол. и геофиз.* **45** 1045 (2004)
24. Зайцев В Ю, Назаров В Е, Таланов В И *Акуст. журн.* **45** 799 (1999)
25. Авербах В С и др. *Акуст. журн.* **51** (доп. вып.) 31 (2005)
26. Zaitsev V, Nazarov V, Gusev V, Castagnede B *NDT&E Int.* (2005) (in press)

PACS numbers: 43.25.+y, 43.30.Pc, 83.80.Fg, 92.10.-c

Нелинейная акустическая диагностика земных пород и океана

И.Б. Есипов, С.А. Рыбак, А.Н. Серебряный

1. Введение

Исследования в области нелинейной акустики в нашей стране были стимулированы в 40-х и 50-х годах XX в. пионерскими работами Н.Н. Андреева. Первый выпуск *Акустического журнала*, основанного в 1955 г., открывает его статья "О некоторых величинах второго порядка в акустике" [1]. Затем Л.Д. Розенберг в 1960-х годах создал направления технического и медицинского применения мощного ультразвука [2]. Тогда же Л.М. Бреховских сформулировал проблему взаимодействия акустических и океанических волн [3]. Исследования в этих направлениях развивались многими научными коллективами нашей страны. В последние годы специалисты в области распространения и взаимодействия нелинейных