

ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КРИСТАЛЛОВ

УДК 550.34.094

ОСОБЕННОСТИ ПРОХОЖДЕНИЯ КВАЗИПРОДОЛЬНЫХ УПРУГИХ ВОЛН ЧЕРЕЗ ГРАНИЦУ РАЗДЕЛА ИЗОТРОПНОЙ И АНИЗОТРОПНОЙ СРЕД: ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ

© 2012 г. А. Н. Никитин, Р. Н. Васин, Т. И. Иванкина, А. А. Круглов, Т. Локаичек*,
Л. Т. Н. Фан**

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

E-mail: nikitin@nf.jinr.ru

**Институт геологии Академии наук Чешской Республики, Прага, Чехия*

***Тулский государственный университет, Россия*

Поступила в редакцию 26.05.2011 г.

Проведены теоретические и экспериментальные исследования особенностей распространения упругих волн в двухслойной среде, в которой изотропный слой представлял собой пластину из оргстекла, а анизотропный — монокристаллический кварц. При проведении экспериментов упругие волны генерировались пьезоэлектрическим излучателем, прием осуществлялся при контакте пьезоэлектрического датчика-приемника с поверхностью модельной среды. Определение времени прохождения квазипродольной упругой волны выполнено методом статистики высокого порядка. На границе раздела слоев в общем случае происходит расщепление падающих упругих волн — имеет место двойное отражение лучей и тройное лучепреломление. Экспериментально зарегистрированные зависимости времен прохождения квазипродольных расщепленных волн от углов преломления удовлетворительно согласуются с рассчитанными теоретически. Расчет был проведен решением уравнения Кристоффеля с учетом граничных условий.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время изучение анизотропии свойств кристаллов, горных пород, конструктивных материалов является одним из важных направлений физического материаловедения и геофизики. Учет анизотропии упругих свойств вещества литосферы Земли важен, например, для сейсмологии.

В [1–3] нейтронографическими и акустическими методами исследованы особенности распространения квазипродольных и квазипоперечных упругих волн в образцах горных пород, обладающих кристаллографическими текстурами. В [3] было замечено, что модельные значения коэффициента анизотропии скоростей квазипродольных волн, рассчитанные для текстурированной породы, существенно ниже значений, полученных из прямых ультразвуковых измерений.

Для выяснения причин такого расхождения инициированы и выполнены [3–5]. Авторы применили оригинальный метод описания анизотропии. Вместо использования уравнений, содержащих тензорные величины, ввели так называемые вектор и параметр анизотропии. При этом решение задачи о распространении упругих волн в анизотропной среде и об отражении их от свободной поверхности упрощается. Из проведенного анализа следует, например, что в аксиально-ани-

зотропной среде сосуществуют связанные волны с квазипродольной и квазипоперечной поляризациями, что аналогично выводам, приведенным в [6, 7]. Такие волны распространяются с разными скоростями. Их отражение от поверхности раздела в общем случае незеркально и сопровождается тройным расщеплением. Квазипродольная и квазипоперечная волны содержат и продольную, и поперечную составляющую, что может быть одной из причин, объясняющих расхождение экспериментальных и модельных результатов, обсуждаемых в [2, 3].

В [8] описано распространение упругой волны в анизотропной среде. При этом указано, что только в особых кристаллографических направлениях смешанные волны преобразуются в чистые продольные и поперечные волны.

Задача об отражении и преломлении упругих волн на границе раздела изотропных сред рассмотрена в [6, 7, 9], но прохождение квазипродольных и квазипоперечных волн через границы раздела анизотропных сред, различающихся только коэффициентами упругой анизотропии, изучено недостаточно.

В настоящей работе поставлена задача расчета скоростей упругих волн, пересекающих границу раздела двух сред, и сопоставления с волновой картиной, зарегистрированной эксперименталь-

но для ультразвуковых волн. В модельной двухслойной среде в качестве изотропной среды выбрано оргстекло, анизотропная среда представлена синтетическим монокристаллическим кварцем. Выбор данных материалов обусловлен тем, что они детально изучены и их свойства хорошо известны.

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

В отличие от подхода, рассмотренного в [4, 5], для моделирования распространения и прохождения упругих волн в двухслойной среде использовался традиционный метод, в основу которого положено решение уравнений Кристоффеля в слоях с учетом соответствующих граничных условий.

Известно, что в изотропном твердом теле [8, 10] распространяются две упругие волны. Это продольная волна со скоростью $\sqrt{(\lambda + 2\mu)/\rho_1}$ и поперечная – со скоростью $\sqrt{\mu/\rho_1}$, где ρ_1 – плотность изотропной среды; λ , μ – коэффициенты Ламэ.

Как было отмечено, в монокристалле в общем случае распространяются три смешанные волны: одна квазипродольная и две квазипоперечные волны, они распространяются со скоростями, которые удовлетворяют уравнению Кристоффеля

$$|\rho_2 \omega^2 \delta_{il} - c_{ijkl} k_j k_k| = 0, \quad (1)$$

где ρ_2 – плотность анизотропной среды; c_{ijkl} – тензор упругости; k_j , k_k – компоненты волнового вектора \mathbf{k} ; δ_{ij} – символ Кронекера; ω – частота; $i, j, k, l = x, y, z$.

Компоненты вектора поляризации \mathbf{A} определяют из системы трех однородных уравнений с нулевым определителем, т.е. этот вектор является собственным вектором тензора $\rho_2 \omega^2 \delta_{il} - c_{ijkl} k_j k_k$:

$$(\rho_2 \omega^2 \delta_{il} - c_{ijkl} k_j k_k) A_l = 0. \quad (2)$$

Рассмотрим отдельный случай распространения упругих волн в двухслойной среде, состоящей из пластины оргстекла и монокристалла кварца (тригональная α -фаза), вырезанного в форме прямоугольного параллелепипеда с ребрами, параллельными главным кристаллическим осям $\mathbf{X} - [11\bar{2}0]$, $\mathbf{Y} - [1\bar{1}00]$ и $\mathbf{Z} - [0001]$. Эти оси определяют лабораторную систему координат, в которой описываются направления отраженных и преломленных волн.

На основе справочных данных использованы следующие параметры сред. Оргстекло имеет плотность $\rho_1 = 1.19$ г/см³, коэффициент Пуассона $\sigma = 0.35$ (данные взяты с сайта http://www.associatedplastics.com/forms/acrylic_plastics_data.pdf). В оргстекле измеренное значение скорости продольной упругой волны равно 2660 ± 40 м/с. От-

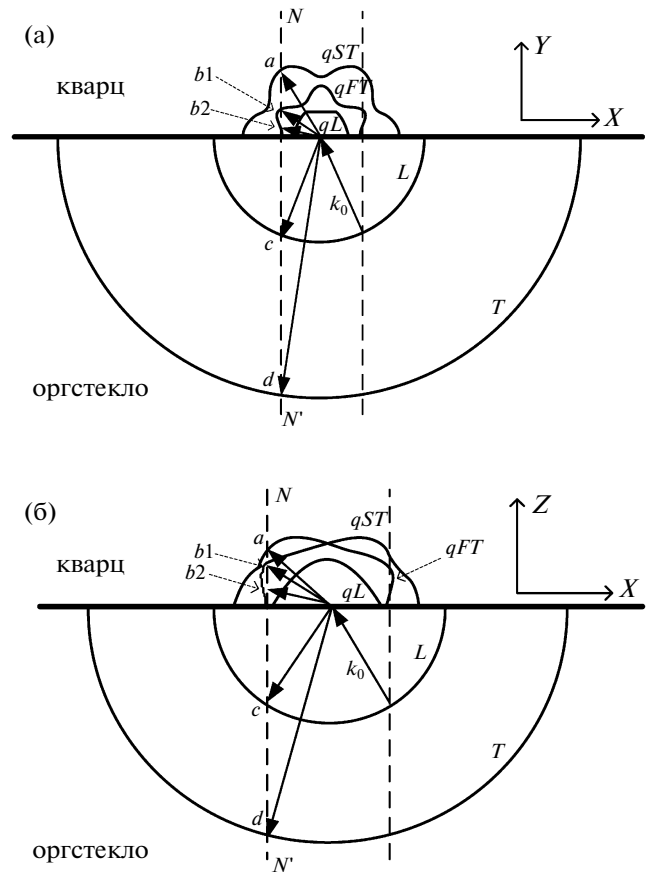


Рис. 1. Рассчитанные сечения поверхностей волновых векторов в двухслойной среде оргстекло–кварц: а – плоскость XY кварца находится в плоскости падения; б – плоскость XZ кварца находится в плоскости падения.

сюда упругие коэффициенты Ламэ: $\lambda = 4534 \pm 136$, $\mu = 1943 \pm 58$ МПа.

Кварц имеет плотность $\rho_2 = 2.649$ г/см³ [11]. Компоненты тензора c_{ijkl} в эквивалентной матричной форме c_{IJ} (пары коэффициентов ij, kl кодированы как один коэффициент I или J соответственно, используя стандартную схему Фогта: $11 \rightarrow 1$; $22 \rightarrow 2$; $33 \rightarrow 3$; $23, 32 \rightarrow 4$; $13, 31 \rightarrow 5$; $12, 21 \rightarrow 6$) имеют следующие значения: $c_{11} = 86.8$, $c_{12} = 7.2$, $c_{13} = 12$, $c_{14} = 17.9$, $c_{33} = 106.4$, $c_{44} = 58.0$, $c_{66} = 0.5$ ($c_{11} - c_{12}$) = 39.8 ГПа [12].

Рассмотрим два случая отражения и преломления упругих волн на границе раздела. В первом случае в плоскости падения лежит кристаллографическая плоскость кварца XY (рис. 1а), во втором – XZ (рис. 1б). Падающая продольная волна с волновым вектором \mathbf{k}_0 проходит слой стекла.

Упругие волны, образующиеся при отражении и преломлении на границе раздела, можно представить с помощью графического построения сечения поверхностей волновых векторов [13].

Изображения сечений поверхностей волновых векторов для системы двух слоев оргстекло–кварц приведены на рис. 1. В оргстекле существуют две ветви акустических волн: L – сечение поверхности волновых векторов для продольной волны, T – для поперечной волны; в кварце существуют три ветви: qL – для квазипродольной волны, qFT и qST – для быстрой и медленной квазипоперечных волн (рис. 1), их фазовые скорости $V_{qST} < V_{qFT} < V_{qL}$. Обозначим физические характеристики падающей волны численным индексом 0. При отражении и преломлении упругих волн на границе раздела двух сред выполняется закон Снеллиуса, т.е. касательная к границе раздела компонента волнового вектора должна сохраниться [8, 10]. Таким образом, в рассматриваемой системе оргстекло–кварц компонента $k_{\parallel x}$ (т.е. параллельная направлению X (рис. 1)) сохраняется. Это граничное условие позволяет определить углы скольжения отраженных и преломленных волн, прошедших через границу раздела сред. Отраженные и преломленные волновые векторы определяются пересечениями линии NN' с сечением поверхностей волновых векторов. Из сравнения рис. 1а и 1б видно, что картины отраженных и преломленных от границы оргстекло–кварц упругих волн зависят от симметрии упругих свойств кварца.

Уменьшая угол скольжения падающей волны (т.е. перемещая влево линию NN' , перпендикулярную границе раздела сред, на рис. 1), можно убедиться, что количество пересечений линии NN' с поверхностью волновых векторов меняется. Сначала линия NN' пересекает все акустические ветви в одной точке. При этом в стекле образуются две отраженные волны (отраженная продольная и поперечная волны), а в кварце – три преломленные волны (преломленная квазипродольная и квазипоперечные волны). На рис. 1 видно, что отраженная продольная волна зеркально отражается относительно падающей волны. В стекле угол скольжения отраженной продольной волны меньше угла скольжения отраженной поперечной волны. В кварце угол скольжения преломленной быстрой квазипоперечной волны больше угла скольжения квазипродольной волны, но меньше, чем у медленной квазипоперечной волны.

При уменьшении угла скольжения падающей волны до первого критического угла линия NN' не пересекает поверхность волновых векторов квазипродольной волны в кварце. Преломленная квазипродольная волна преобразуется при этом в поверхностную [4, 5, 7], энергия которой не уходит от границы раздела и экспоненциально убывает с возрастанием расстояния от границы раздела в кварце.

При дальнейшем уменьшении угла скольжения падающей продольной волны линия NN' пе-

ресекает поверхность волновых векторов для быстрой квазипоперечной волны (акустическую ветвь qFT) в двух точках $b1$ и $b2$ (рис. 1). Тогда в кварце могут образоваться три преломленные квазипоперечные волны, в том числе две на одной акустической ветви. Однако в кристалле вследствие его упругой анизотропии направления распространения энергии упругих волн часто не совпадают с направлением их фазовых скоростей. Компоненты плотности энергии упругих волн могут быть рассчитаны по формуле [10]:

$$f_j = -|r|^2 \sigma_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial t}, \quad (3)$$

где f_j – компоненты вектора плотности энергии; r – коэффициент отражения или преломления; σ_{ij} – тензор механического напряжения; u_i – компоненты вектора смещения u ; t – время.

В анизотропной среде направления распространения энергии значительно отличаются от направлений соответствующих волновых векторов. В кварце это отклонение составляет десятки градусов [14]. Отраженные или преломленные волны в среде наблюдаются, если энергия этих волн направлена в ней от границы раздела. По формуле (3) были вычислены компоненты вектора плотности энергии волны, соответствующей волновому вектору, определяемому точкой пересечения $b2$ (рис. 1). Расчет показывает, что энергия этой волны не направлена в глубь кварца, а уходит от кварца, в слой оргстекла. Векторы плотности энергии упругих волн, соответствующих точкам пересечения a и $b1$ (рис. 1), направлены в глубь кварца. Таким образом, в кварце распространяются только две преломленные поперечные волны. Волна, соответствующая точке $b2$, не существует.

Если продолжить уменьшать угол скольжения падающей продольной волны до второго критического угла скольжения, то линия NN' не пересекает поверхность волновых векторов для быстрой квазипоперечной волны (акустическую ветвь qFT), т.е. одна преломленная квазипоперечная волна преобразуется в поверхностную. В кварце преломляется лишь медленная квазипоперечная волна qST . Уменьшая наклон падающей волны до третьего критического угла скольжения, увидим, что линия NN' не пересекает вообще поверхности волновых векторов в кварце, все преломленные волны преобразуются в поверхностные.

Таким образом, на границе раздела оргстекло–кварц происходит в общем случае расщепление падающей продольной упругой волны на пять лучей. В стекле отражаются продольная (L) и поперечная волны (T). В кварце преломляются квазипродольная (qL), быстрая квазипоперечная (qFT) и медленная квазипоперечная волны (qST).

Закон сохранения компоненты волнового вектора, касательной к границе раздела, записывается в виде

$$k_{0\parallel X} = k_{qL\parallel X} = k_{qFT\parallel X} = k_{qST\parallel X} = k_{L\parallel X} = k_{T\parallel X}. \quad (4)$$

Рисунок 2а представляет собой зависимости углов скольжения α расщепленных волн от угла скольжения падающей продольной волны. С учетом граничных условий (4) рассчитаны критические углы скольжения падающей волны. Соответствующие значения углов приведены в таблице.

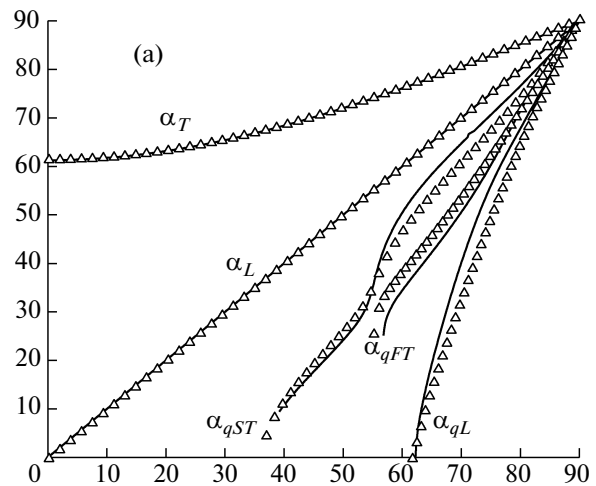
С учетом полученных значений углов скольжения преломленных волн из формулы (1) получены значения скоростей распространения этих волн (рис. 2б).

Для определения поляризации волн qL , qFT , qST по формуле (2) были определены проекции вектора поляризации на кристаллографические оси X , Y , Z кварца и вычислены углы между направлением распространения волны (волновым вектором) \mathbf{k} и вектором поляризации \mathbf{A} . Наименьшее значение этого угла для преломленной квазипоперечной волны qST равно $83^\circ 6'$, а для волны qFT оно составляет $65^\circ 9'$ для случая, когда плоскость падения $\parallel XY$. Когда плоскость падения $\parallel XZ$, наименьшие значения углов соответственно равны $72^\circ 32'$ для волны qST и $80^\circ 23'$ для волны qFT . Таким образом, вектор поляризации квазипоперечных волн практически перпендикулярен волновому вектору. Наоборот, для преломленной квазипродольной волны qL наибольший угол между волновым вектором и вектором поляризации составляет $25^\circ 34'$ (когда плоскость падения $\parallel XY$) и $22^\circ 1'$ (когда плоскость падения $\parallel XZ$). Направление вектора поляризации преломленной квазипродольной волны ориентировано близко к направлению волнового вектора.

Также по формуле (3) можно рассчитать энергию отраженных и преломленных волн (относительно энергии падающей волны). При прохождении упругих волн через границы раздела удовлетворяются условия непрерывности вектора смещения и компонент тензора механического напряжения, действующего на плоскость с нормалью \mathbf{n} . Тогда компоненты тензора механического напряжения имеют вид $\Sigma_i = \sigma_{ij} n_j$ [3]. С учетом этого были найдены коэффициенты отражения и преломления всех расщепленных волн.

Закон сохранения энергии требует, чтобы при отражении и преломлении волн на границе раздела энергия, выходящая от границы раздела была равна энергии, падающей на границу раздела. Расчет показывает, что энергия отраженной поперечной волны, поляризация которой перпендикулярна плоскости падения, мала: менее 0.1% от энергии падающей волны. А энергия остальных отраженных и преломленных волн достаточ-

Углы скольжения расщепленных волн, град



Скорости преломленных волн, м/с

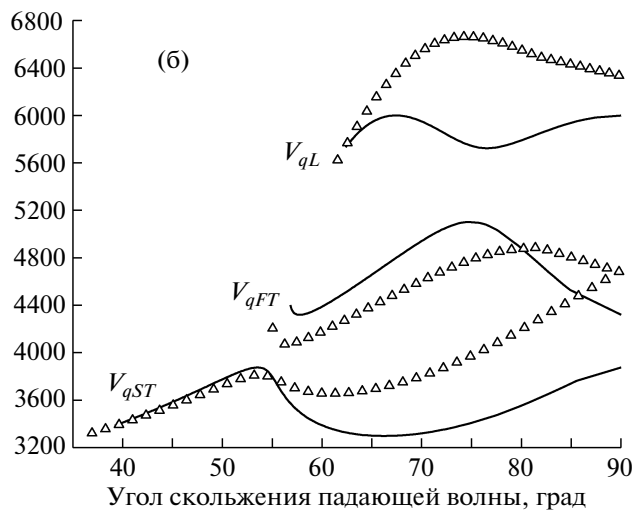


Рис. 2. Рассчитанные зависимости углов скольжения расщепленных волн (а) и скоростей преломленных волн (б) от угла скольжения падающей продольной волны; плоскости кварца XY (Δ) и XZ (—) находятся в плоскости падения.

но велика и они могут регистрироваться пьезоэлектрическими преобразователями.

Таким образом, на основе теоретического анализа заключаем, что преобразование преломлен-

Значения критических углов скольжения падающей волны для случаев, когда в плоскости падения лежат кристаллографические плоскости кварца XY (рис. 1а) или XZ (рис. 1б)

Критический угол	Плоскость падения $\parallel XY$	Плоскость падения $\parallel XZ$
Первый	$62^\circ 22'$	$62^\circ 52'$
Второй	$56^\circ 46'$	$55^\circ 13'$
Третий	$39^\circ 11'$	$36^\circ 52'$

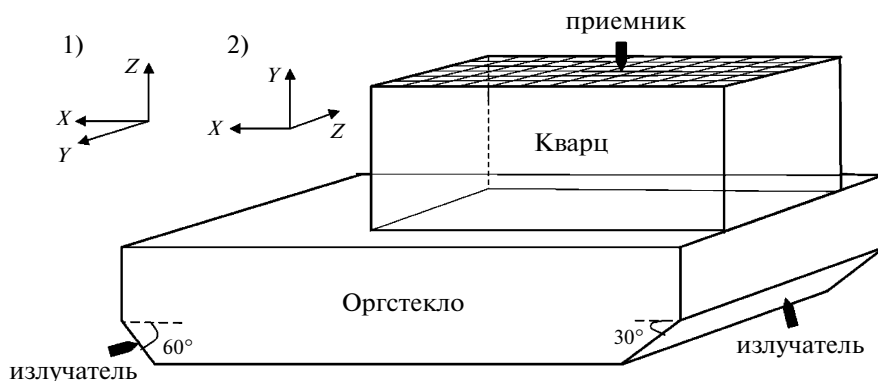


Рис. 3. Схема эксперимента. Различные ориентировки кварца: кристаллографические плоскости кварца XZ (1) и XY (2) находятся в плоскости падения. Излучатель по очереди закреплялся на секущих плоскостях стекла, составляющих с границей раздела углы 30° и 60° соответственно.

ных волн, в частности, преобразование преломленной квазипродольной волны существенно зависит от угла скольжения падающей продольной волны. При значении угла скольжения падающей волны меньше первого критического угла, преломленная квазипродольная волна преобразуется в поверхностную. Значения скорости и угла скольжения преломленных волн так же отличаются при разных ориентировках кристаллографических осей кварца относительно границы раздела оргстекло-кварц. Эти различия являются следствием анизотропии монокристалла кварца.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Физическая двухслойная модель среды и методика акустического эксперимента. Схема эксперимента показана на рис. 3. Образец из кварца представляет собой параллелепипед размером $30.45 \times 30.45 \times 60.50$ мм ($Y \times Z \times X$ соответственно). Образец из оргстекла также выполнен в форме параллелепипеда $99.9 \times 49.9 \times 19.9$ мм и имеет две секущие боковые плоскости, расположенные под углами 30° и 60° . Ширина этих секущих плоскостей — 8 мм (рис. 3). Поверхности диэлектрика (оргстекло) и кварца, обращенные друг к другу, были отшлифованы.

Кварц наклеивается на стекло слоем специального масла. Пьезодатчик-излучатель расположен в центре секущих плоскостей. Приемник перемещается по верхней поверхности кварца с шагом 5 мм (рис. 3). В экспериментах были использованы пьезоэлектрические преобразователи двух типов со следующими характеристиками: датчик $D1$ — диаметр поверхности контакта составляет 1 мм, частота излучаемого сигнала ~ 200 кГц; датчик $S5$ — диаметр поверхности контакта — 4 мм, частота излучаемого сигнала — 5 МГц. Для каждой ориентации кварцевого образца прохождение упругих волн зарегистрировано

двумя способами: излучатель $D1$ и приемник $D1$; излучатель $S5$ и приемник $S5$.

В результате перемещения приемника по поверхности кварца получен набор волновых форм акустических сигналов. Они представляют собой временные зависимости амплитуды сигнала (электрического напряжения на пьезодатчике). Дополнительно были получены амплитуды сигнала, усиленного усилителем в 10 раз. Последнее существенно упрощает определение времени прихода квазипродольных волн, особенно в случае использования низкочастотных датчиков $D1$.

Результаты акустических экспериментов. Для определения времени прихода самой быстрой упругой волны в среде на основе зарегистрированной пьезоэлектрическим приемником волновой формы использовался метод статистики высокого порядка [15]. Самой быстрой упругой волной при прохождении рассматриваемой двухслойной среды является преломленная на границе оргстекло—кварц квазипродольная волна. Регистрировавшиеся в эксперименте акустические сигналы содержат 1891 точку. Частота дискретизации АЦП 40 МГц, т.е. время между последовательными отсчетами — 0.025 мкс, полная длительность каждой зарегистрированной волновой формы равна 47.275 мкс. Каждый сигнал делился на серии окон по 512 точек, причем соседние окна перекрываются на 128 точек. В каждом окне была рассчитана условная энергия сигнала как сумма квадратов амплитуд. По изменению этой условной энергии во всех окнах можно определить, в каком из них регистрируется приход квазипродольной волны: при переходе из окна, содержащего только шум, в окно, содержащее квазипродольную волну, условная энергия существенно возрастает. Отметим, что аналогичное поведение условной энергии наблюдается при переходе из окна с квазипродольной волной в окно, содержащее квазипоперечную волну [16].

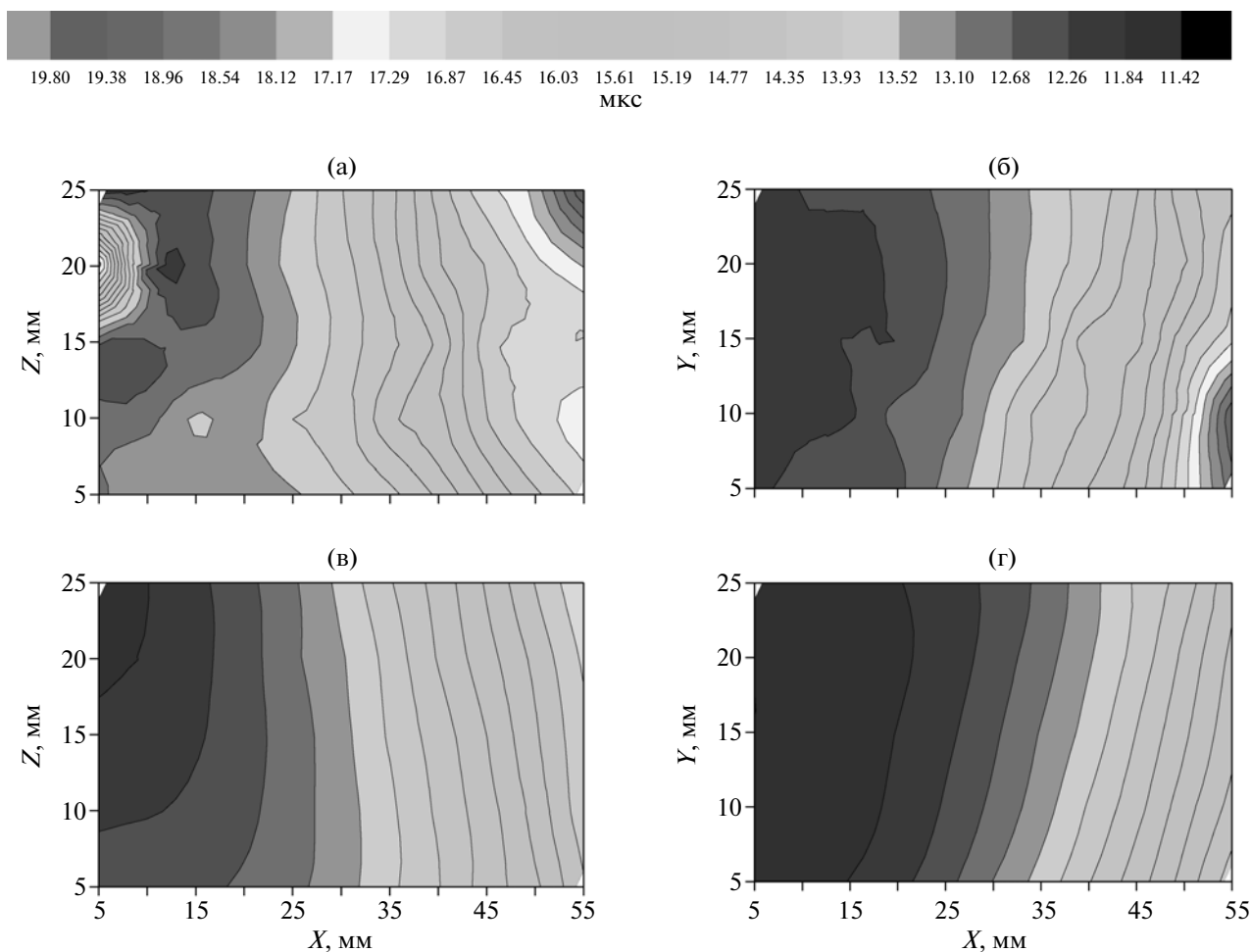


Рис. 4. Экспериментальные результаты распределения времени прихода квазипродольной волны на верхнюю поверхность кварца в случае, когда излучатели расположены на секущих плоскостях пластины стекла под углом 30° . Кристаллографические плоскости XY (левая колонка) и XZ (правая колонка) кварца лежат в плоскости падения; а, б – излучатель и приемник $D1$ – 200 кГц, в, г – излучатель и приемник $S5$ – 5 МГц.

После установления факта, в какое окно приходит квазипродольная волна, определяется точное время ее прихода. Для этого в данном окне строится новая серия перемещающихся подокон длиной 100 точек. Эти подокна перемещаются по одной точке. В каждом подокне были рассчитаны статистические моменты: первый статистический момент S_1 – среднее значение, второй – стандартное отклонение S_2 , третий – асимметрия S_3 , четвертый – эксцесс S_4 и т.д. Перед точкой прихода самой быстрой волны (т.е. квазипродольной) на волновой форме наблюдается только шум, значения амплитуд сигналов распределяются приблизительно нормально и значения их статистических моментов близки к значениям, соответствующим нормальному распределению. Как только точка прихода квазипродольной волны попадает в подокно, нормальное распределение искажается, и статистические моменты резко меняются. Таким образом, по изменениям статистических моментов, особенно моментов высокого поряд-

ка, можно определить время прихода квазипродольной волны. Это время затем корректируется с учетом конкретного времени излучения упругой волны и задержек в корпусах пьезодатчиков.

На рис. 4 и 5 представлены распределения времени прихода квазипродольной волны в двухслойной среде в случае, когда кристаллическая ось Y или Z кварца перпендикулярна контактной поверхности, пьезодатчик-излучатель закреплен на секущих плоскостях пластины стекла под углом 30° или 60° .

Следует заметить, что при использовании датчиков $D1$ зарегистрированное время прихода на ~ 1 мкс больше по сравнению с $S5$. Это связано с тем, что датчик $D1$ – низкочастотный, поэтому обладает “медленным” откликом на приходящую упругую волну, что эффективно увеличивает определяемое время прихода волны. Из полученных результатов очевидно, что при разных ориентировках кристаллической оси кварца (ось Y и ось Z) относительно границы раздела сред (срав-

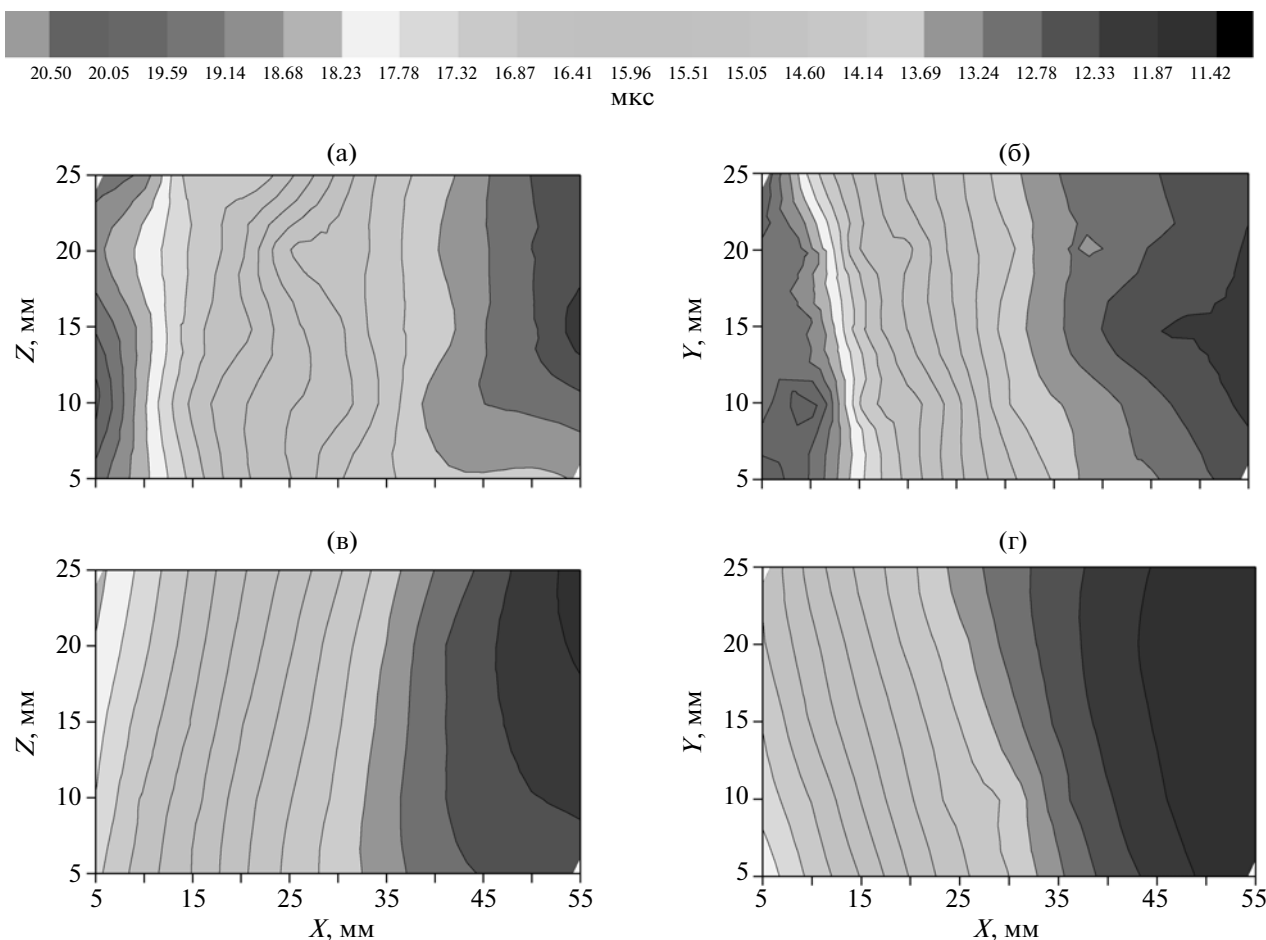


Рис. 5. Экспериментальные результаты распределения времени прихода квазипродольной волны на верхнюю поверхность кварца, излучатели расположены на секущих плоскостях пластины стекла под углом 60° . Кристаллографические плоскости XY (левая колонка) и XZ (правая колонка) кварца лежат в плоскости падения; а, б – излучатель и приемник $D1 - 200$ кГц, в, г – излучатель и приемник $S5 - 5$ МГц.

нить левую и правую колонки рис. 4, 5) времена прихода квазипродольных волн на верхнюю поверхность кварца различаются на $0.5-1.5$ мкс вследствие анизотропии монокристалла кварца.

Необходимо отметить, что на основе зарегистрированной пьезоэлектрическим приемником волновой формы времена прихода квазипоперечных волн не могут быть точно обнаружены, поскольку для разделения квазипоперечной и квазипродольной волн необходимо измерять трехмерные волновые формы. А в данном эксперименте были зарегистрированы одномерные и двумерные волновые формы. Таким образом, предсказанное теоретически расщепление падающей волны на границе раздела стекло–кварц в эксперименте не наблюдается.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

С учетом размера образцов определены координаты пьезодатчика-приемника, перемещаемого по поверхности кварца, при которых он реги-

стрировал преломленные квазипродольные волны. Из простых геометрических соображений были вычислены позиции приемника X_{qL} (когда излучатель закреплен на секущей плоскости под углом 30°) (рис. 6а) и X_{qL}^* (когда излучатель закреплен на секущей плоскости под углом 60°) (рис. 6б) на поверхности кварца относительно края кварцевого бруска в зависимости от угла скольжения падающей волны.

Угол скольжения преломленной квазипродольной волны α_{qL} теоретически найден с использованием данных, приведенных на рис. 2а. Из рис. 6 видно, что в случае, когда излучатель расположен на секущей плоскости под углом 30° , в каждой точке на поверхности кварца пьезодатчик-приемник регистрирует сигнал преломленной квазипродольной волны. Когда излучатель расположен на секущей плоскости под углом 60° , из-за ограниченного размера исследуемой двухслойной среды оргстекло–кварц, максимальный угол скольжения падающей волны равен 64° (а

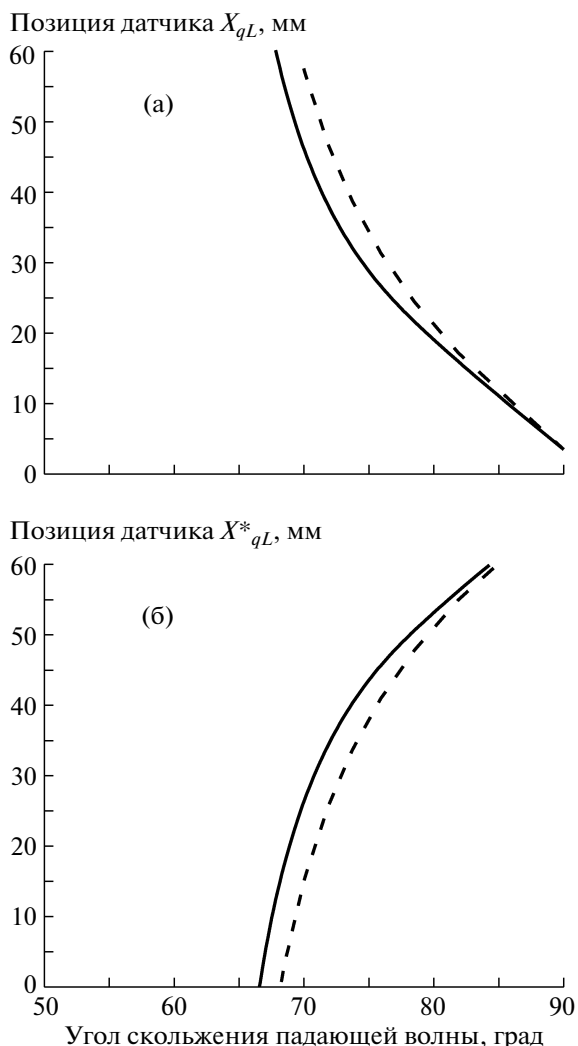


Рис. 6. Зависимости положения приемника акустических волн от угла скольжения падающей продольной волны. Излучатель расположен на секущих плоскостях пластины стекла под углами 30° (а) и 60° (б); плоскости кварца XY (сплошная) и XZ (пунктирная) находятся в плоскости падения.

первые критические углы скольжения падающей волны равны $62^\circ 22'$ и $62^\circ 52'$ для разной ориентировки кварца (таблица). Таким образом, на рис. 6б на верхней поверхности кварца не будет появляться преломленная квазипродольная волна, но эксперимент показывает, что она существует (рис. 5).

По-видимому, из проведенного эксперимента значения скоростей распространения преломленных квазипродольных волн нельзя вычислить корректно. Траектория распространения волн в двухслойной среде экспериментально определяется неоднозначно для различных углов скольжения падающей волны, так как упругие волны могут лежать не в плоскости падения. Для сравнения экспериментальных данных с расчетом были

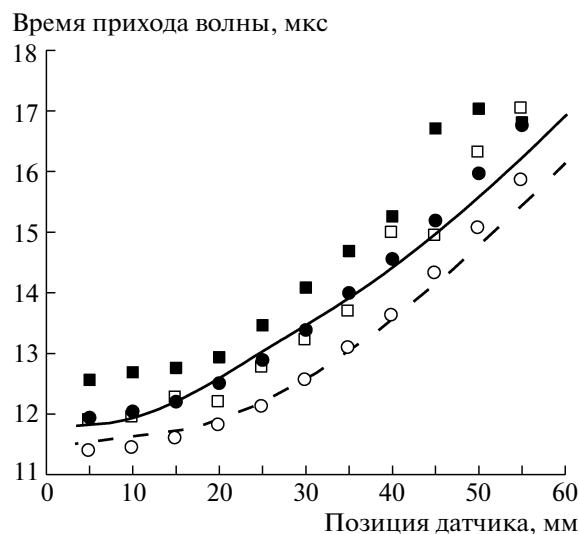


Рис. 7. Сравнение экспериментальных значений времени прихода квазипродольной волны на верхнюю поверхность кварца с теоретическим расчетом. Излучатель расположен на секущей плоскости пластины стекла под углом 30° ; плоскости кварца XY (■ – D1, ● – S5) и XZ (□ – D1, ○ – S5) находятся в плоскости падения (пунктирная – теория).

проведены вычисления предполагаемого времени прохождения упругой волны через двухслойную систему. Для случая, когда излучатель закреплен на секущей плоскости под углом 30° , использована формула

$$t_{qL} = t_{plexiglass} + t_{quartz} = \frac{19.9 - 4 \sin 30^\circ}{\sin \alpha_0} \frac{1}{V_L} + \frac{30.45}{\sin \alpha_{qL}} \frac{1}{V_{qL}}, \quad (5)$$

где величины, входящие в формулу, показаны на рис. 2а, 2б. α_0 – угол скольжения падающей продольной волны.

Зависимость времени прихода квазипродольной волны t_{qL} от позиции приемника на поверхности кварца для случая, когда излучатель закреплен на секущей плоскости под углом 30° , представлена на рис. 7 (сплошная линия). Из-за анизотропии исследуемой среды существует различие времени прихода квазипродольной волны в зависимости от ориентации кристаллографических осей кварца относительно плоскости падения.

На рис. 7 показаны экспериментальные и теоретические зависимости значений времен прихода квазипродольной волны (только в плоскости падения) на верхнюю поверхность кварца от позиции, когда излучатель закреплен на секущей плоскости под углом 30° . Видно, что экспериментальные значения в целом согласуются с теоретическими расчетами. Тем не менее наблюдается расхождение в результатах времени прихода ква-

зипродольной волны на периферийном участке графика на рис. 7.

Указанное несоответствие, а также установленное в эксперименте присутствие квазипродольной преломленной волны, которая не должна быть зарегистрированной на основе теоретических расчетов, можно объяснить рядом факторов:

– излучатель имеет определенный размер, т.е. не является точечным источником упругих волн;

– когда падающая волна доходит до границы раздела, появляется вторичный сферический источник, испускающий волны во всех направлениях;

– применялся тонкий слой специального масла на контактной поверхности оргстекло–кварц, в результате чего падающая продольная волна, проходя через границу раздела на нижней поверхности пластины кварца, не преломлялась, а прямо распространялась из стекла в масло, а затем из масла в кварц.

В настоящей работе роль пьезоэлектрического эффекта в кварце не учитывалась. В пьезоэлектрической среде связь между электрическими и механическими величинами приводит к взаимодействию упругих и электромагнитных волн. При более строгом анализе распространения волн в пьезоэлектрическом кристалле нужно решать одновременно уравнение Ньютона и уравнения Максвелла. Упругие волны в пьезоэлектрике становятся смешанными упругоэлектромагнитными, т.е. упругие волны сопровождаются электрическим полем, а электромагнитная компонента возбуждает акустическую волну [17]. Благодаря пьезоэлектрическому эффекту сечения поверхностей обратных скоростей в кварце немного искажаются по сравнению с пьезоэлектрически нейтральной средой. Поэтому с учетом пьезоэффекта значения углов преломления и скоростей преломленных волн в кварце должны будут значительно отличаться от приведенных выше значений. Действительно, результаты расчета показывают, что разность значений скоростей составляет менее 37 м/с, когда плоскость XU кварца находится в плоскости падения, и меньше 25 м/с, когда в плоскости падения находится плоскость XZ кварца. Отличие углов преломления составит не более 1° . Таким образом, отклонение значения времени прихода преломленных волн на поверхности кварца очень мало (меньше 1%), и этим расхождением можно пренебречь.

Кроме того, в [18] показано, что экспериментальная проверка эффектов взаимной трансформации акустических и электромагнитных волн заведомо невозможна. Для такой проверки потребовались бы сверхточное задание углов скольжения и исключительно широкие апертуры пучков акустических и электромагнитных волн.

В настоящей работе также не учитываются нелинейные (ангармонические) эффекты [10], которые могут вызывать отклонение полученных вычисленных значений от экспериментальных.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе проведено моделирование распространения упругих волн в двухслойной среде оргстекло–кварц. На границе раздела в общем случае происходит расщепление упругих волн: двойное отражение и тройное лучепреломление. В оргстекло отражаются продольная и поперечная волны, но амплитуда поперечной волны с поляризацией, перпендикулярной плоскости падения, мала. В кварце далее распространяются одна квазипродольная и две квазипоперечные волны. При уменьшении угла скольжения падающей волны некоторые волны преобразуются в поверхностные.

Предсказанные теоретические значения удовлетворительно согласуются с экспериментом в случае, когда излучатель расположен на секущей плоскости под углом 30° пластины из оргстекла. Когда излучатель расположен на секущей плоскости под углом 60° , из расчетов следует, что квазипродольная волна не должна регистрироваться на поверхности кварца, но эксперимент показывает, что она существует.

К основным особенностям распространения квазипродольной волны через границу раздела оргстекло–кварц относятся характерные зависимости значений скоростей (времен прихода) квазипродольной волны от углов скольжения падающей волны, а также от анизотропии (симметрии упругих свойств) монокристалла кварца.

Работа выполнена при частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 10-05-00722); грантов полномочного представителя Чешской Республики в ОИЯИ, приказ № 73 от 01.02.2011, пп. 17, 18; гранта для молодых ученых и специалистов ОИЯИ 2010 г., а также Грантового агентства Чешской Республики, проект № P104/12/0915 и исследовательской темы № AVOZ 30130514 Института геологии Академии наук Чешской Республики.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Никитин А.Н., Иванкина Т.И. // Физика элементарных частиц и атомного ядра. 2004. Т. 35. № 2. С. 348.
2. Kern H., Ivankina T.I., Nikitin A.N. et al. // Tectonophysics. 2008. V. 457. № 3–4. P. 143.
3. Никитин А.Н., Иванкина Т.И., Игнатович В.К. // Физика Земли. 2009. № 5. С. 57.
4. Игнатович В.К., Фан Л.Т.Н. // Акустика неоднородных сред. Ежегодник Рос. акуст. о-ва. Сб. тр.

- науч. шк. Рыбака С.А. М.: ГЕОС, 2009. Вып. 10. С. 26.
5. *Ignatovich V.K., Phan L.T.N.* // Am. J. Phys. 2009. V. 77. № 12. P. 1162.
 6. *Саваренский Е.Ф., Киринос Д.П.* Элементы сейсмологии и сейсмометрии. М.: Изд-во технико-теоретической лит., 1955. 544 с.
 7. *Красильников В.А., Крылов В.В.* Введение в физическую акустику. М.: Наука, 1984. 403 с.
 8. *Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.* Теоретическая физика. Т. 7. Теория упругости. М.: ФизМатЛит, 2003. 264 с.
 9. *Бреховских Л.М.* Волны в слоистых средах. М.: Наука, 1973. 343 с.
 10. *Труэлл Р., Эльбаум Ч., Чик Б.* Ультразвуковые методы в физике твердого тела. М.: Мир, 1972. 307 с.
 11. *Блистанов А.А., Бондаренко В.С., Переломова Н.В. и др.* Акустические кристаллы. М.: Наука, 1982. 632 с.
 12. *Зубов В.Г., Фирсова М.М.* // Кристаллография. 1962. Т. 7. Вып. 3. С. 469.
 13. Физическая энциклопедия. Т. 3 / Под ред. Прохорова А.М. М.: Большая Российская энциклопедия, 1992. 672 с.
 14. Физическая энциклопедия. Т. 2 / Под ред. Прохорова А.М. М.: Большая Российская энциклопедия, 1990. 703 с.
 15. *Lokajicek T., Klima K.* // Measurement Sci. Technol. 2006. V. 17. № 9. P. 2461.
 16. *Colak O.H., Destici T.C., Ozen S. et al.* // Arab. J. Sci. Eng. A. 2008. V. 34. № 1. P. 79.
 17. *Дьелесан Э., Руайе Д.* Упругие волны в твердых телах. Применение для обработки сигналов. М.: Наука, 1982. 424 с.
 18. *Балакирев М.К., Гилинский И.А.* Волны в пьезокристаллах. Новосибирск: Наука, 1982. 237 с.