АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ, 2007, том 53, № 5, с. 637–644

КЛАССИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ЛИНЕЙНОЙ АКУСТИКИ И ТЕОРИИ ВОЛН

УДК 534.2

ВЛИЯНИЕ ЖИДКОСТИ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ АНТИСИММЕТРИЧНЫХ ВОЛН ЛЭМБА В ТОНКИХ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПЛАСТИНАХ

© 2007 г. И. Е. Кузнецова, Б. Д. Зайцев, С. Г. Джоши*, А. А. Теплых

Саратовский филиал Института радиотехники и электроники РАН
410019 Саратов, ул. Зеленая, 38
**EECE Dept., Marquette University, Milwaukee, WI 53201-1881, USA*
E-mail: kuziren@yandex.ru

Поступила в редакцию 20.02.06 г.

В работе теоретически и экспериментально исследовано влияние невязкой, непроводящей и идеально упругой жидкости на характеристики акустической антисимметричной (A_0) волны Лэмба нулевого порядка в тонкой по сравнению с длиной волны пластине 128YX $LiNbO_3$. Предложена методика расчета скорости и затухания этой волны для различных значений параметра hf (h – толщина пластины, f – частота волны). Исследованы также характеристики A_0-волн в пьезоэлектрической пластине, граничащей с различными типами невязкой, непроводящей и идеально упругой жидкости с двух сторон. Показана возможность создания экспресс анализатора жидкости на основе такой структуры.

PACS: 68.08.-P; 77.65.Dq

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время известно много публикаций, посвященных исследованию влияния жидкости на характеристики различных типов акустических волн (поверхностных, утекающих, волн в пластинах и т.д.) [1–7]. Подобный интерес связан с возможностью разработки и создания различных акустических устройств, работающих в контакте с жидкостью, которые можно разделить на две группы. К первой группе относятся устройства, для которых излучение энергии волны в глубь жидкости является нежелательным источником потерь [1–4]. Это различные биологические и химические датчики, работающие в контакте с жидкостью и реагирующие на изменение ее физических и химических свойств. Что касается приборов другой группы, то они основаны на эффективном излучении энергии волны в жидкость [5–7]. К ним относятся, например, излучатели и приемники акустической волны, распространяющейся в жидкости [7], которые используются для определения скорости движения жидкостных потоков. И в том и в другом случае возможно использование антисимметричной волны Лэмба (A_0) нулевого порядка, распространяющейся в тонкой по сравнению с длиной волны пьезоэлектрической пластине. В этом случае максимальная компонента механического смещения волны A_0 всегда нормальна к поверхности пластины [8, 9]. Это приводит к тому, что ее распространение в контакте с жидкостью может сопровождаться большим затуханием, связанным с интенсивным излучением объемной акустической (ОАВ) волны в жидкость. При этом скорость волны в структуре "пластина – жидкость" V, должна быть больше, чем скорость ОАВ в жидкости V_{lq} [5, 8, 9]. Если же наблюдается противоположная ситуация $V_{lq} > V$, то затухание волны, связанное с излучением в жидкость, полностью отсутствует [5, 8, 9]. Этот вывод подтвержден в [6], где экспериментальное исследование влияния жидкости на характеристики волны A_0 в изотропных пластинах показало, что затухание волны A_0 возникает при $V_{lq} = V$ и с увеличением параметра hf оно уменьшается. Поскольку скорость волны A_0 меняется в широких пределах при изменении характерного параметра hf (h – толщина пластины, f – частота волны) [10], то путем подбора этого параметра можно реализовать любой из вышеперечисленных режимов.

В связи с этим в данной работе проведено экспериментальное и теоретическое исследование распространения волн A_0 в пьезоэлектрических пластинах, граничащих с одной стороны с невязкой и непроводящей жидкостью. Сравнение теоретических результатов с экспериментальными позволило выработать критерий выбора собственных значений для парциальных волн и уточнить методику расчета характеристик волны A_0 в присутствии жидкости. Теоретически также анализируется ситуация, когда пьезоэлектрическая пластина граничит с обеих сторон с разными ти-

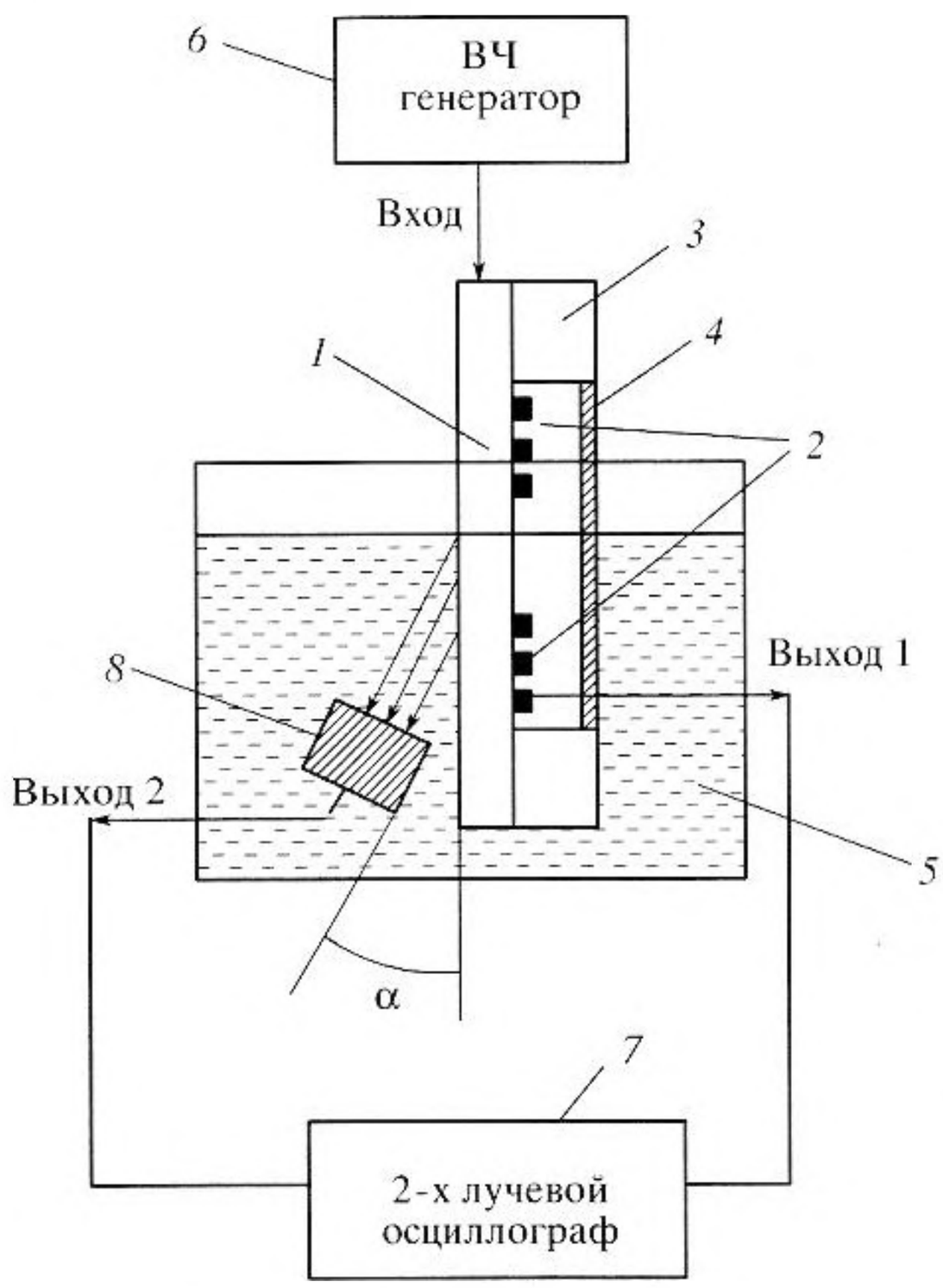

Рис. 1. Схема эксперимента. *1* – пьезопластина, *2* – встречно-штыревые преобразователи, *3* – держатель, *4* – герметизирующая заглушка, *5* – вода, *6* – ВЧ генератор, *7* – двухлучевой осциллограф, *8* – пьезоэлектрический преобразователь ОАВ.

пами невязкой и непроводящей жидкости. Показана возможность практического использования полученных результатов.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЖИДКОСТИ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ВОЛНЫ A_0 В ПЛАСТИНЕ НИОБАТА ЛИТИЯ

Для измерения характеристик волны A_0 в пластине ниобата лития, граничащей с одной стороны с жидкостью, использовалась экспериментальная установка, схема которой приведена на рис. 1. Для эксперимента была выбрана пластина ниобата лития (1) 128Y среза с направлением распространения волны вдоль оси *X*. Указанная кристаллографическая ориентация отличается наибольшим коэффициентом электромеханической связи (~7%) для волны A_0. Эта пластина со встречно-штыревыми преобразователями (ВШП) (2) прикреплялась к специальному держателю (3) с окном, так что часть пластины, по которой распространялась акустическая волна, оказывалась механически свободной. С другой стороны указанное окно герметически заклеивалось заглушкой (4). Это устройство помещалось в дистиллированную воду (5), как показано на рис. 1, и могло перемещаться с помощью прецизионного устройства в вертикальном направлении. При этом верхний, излучающий ВШП, соединенный с ВЧ генератором Г4-18а(6), все время находился выше уровня жидкости, а нижний приемный ВШП, соединенный с первым каналом двухлучевого осциллографа С1-120 (7), находился ниже уровня жидкости. Таким образом, максимальная глубина погружения составляла 20 мм. Измеряя изменение амплитуды выходного сигнала при изменении расстояния от нижнего ВШП до уровня жидкости определялось удельное затухание волны A_0 в присутствии жидкости. При этом точность измерения затухания на длину волны составляла ±2%. Для измерения фазовой скорости моды использовался пьезоэлектрический преобразователь ОАВ (8), угловое положение которого относительно пластины менялось с помощью прецизионного механизма. Измеряя угол α между пластиной и направлением распространения ОАВ в жидкости, определялась скорость волны A_0 как

$$V = V_{lq}/\cos\alpha, \qquad (1)$$

где V_{lq} – скорость продольной объемной акустической волны (ОАВ) в жидкости. Угловое положение преобразователя ОАВ определялось по максимуму выходного сигнала, наблюдаемого на втором канале двухлучевого осциллографа. При этом точность измерения фазовой скорости не превышала 2.2% при точности измерения угла ±1°. Указанная конструкция держателя позволяла изменять толщину пластины ниобата лития путем ее шлифовки и полировки от 500 мкм до 100 мкм при фиксированной длине волны равной периоду ВШП (1.5 мм). Каждый встречно-штыревой преобразователь состоял из 5 пар штырей с апертурой 20 мм, расположенных на расстоянии 20.2 мм друг от друга. Длительность входного ВЧ импульса с рабочей частотой 0.8–1.5 МГц выбиралась равной 6 мкс, при которой обеспечивалось достижение максимальной величины выходного сигнала для используемой геометрии ВШП и отсутствие смешивания с переотраженными сигналами. Следует отметить, что при выбранной геометрии и кристаллографической ориентации паразитные сигналы, связанные с другими модами, полностью отсутствовали. При этом отражение волны A_0 от границы раздела жидкость/воздух было пренебрежимо мало в связи с незначительным изменением скорости волны A_0 в присутствии жидкости (коэффициент отражения по мощности не превышал 10^{-4}) и не учитывалось при обработке результатов измерений. На рис. 2 точками приведены результаты измерения фазовой скорости (а) и затухания на длину волны (б) как функции параметра *hf*. Видно, что скорость

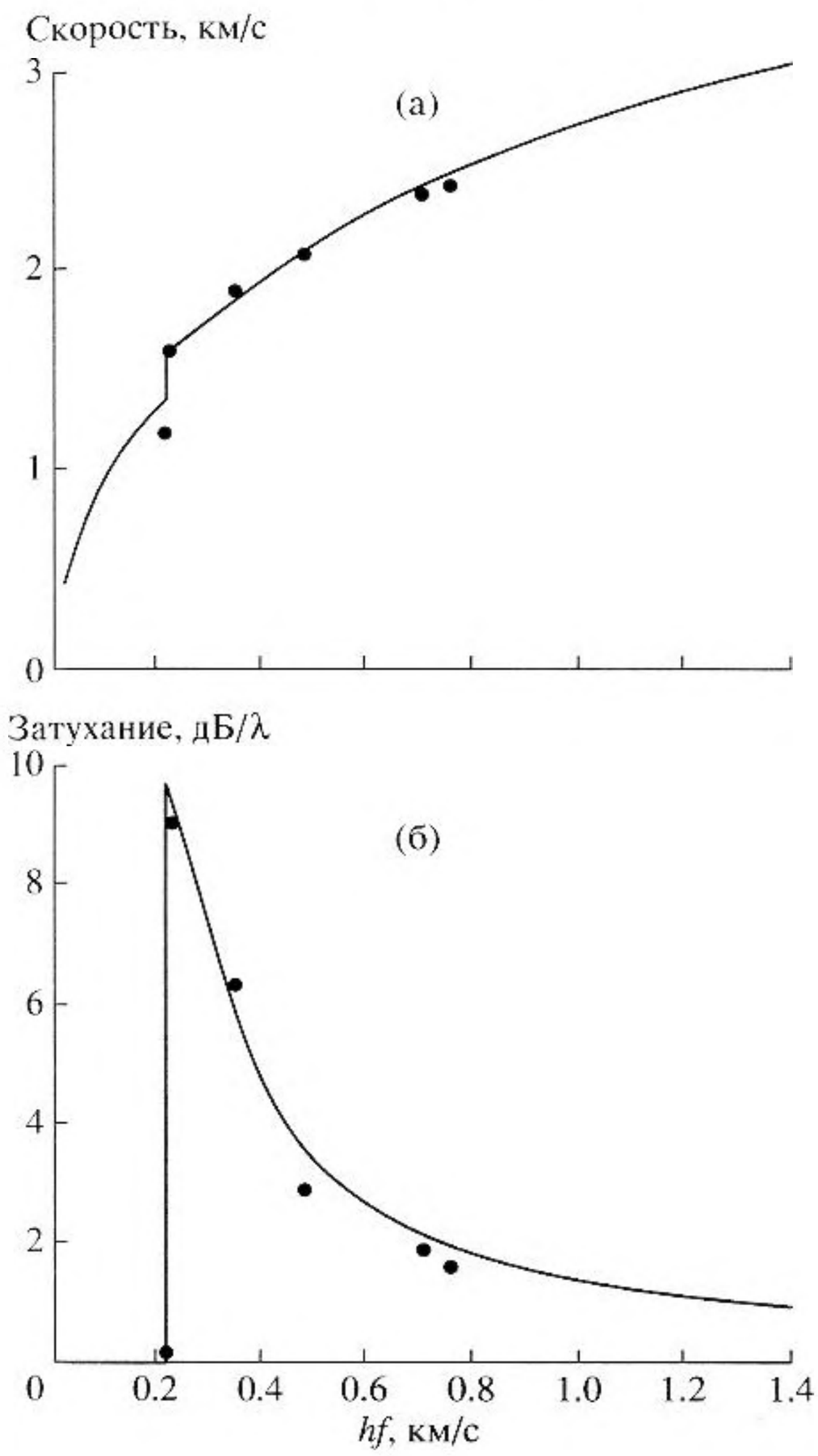

Рис. 2. Зависимости скорости (а) и затухания (б) волны A_0 в структуре "дистиллированная вода – пластина 128YX $LiNbO_3$ – вакуум" от параметра hf. Точки соответствуют экспериментальным данным, сплошные линии обозначают теоретические обобщенные зависимости.

моды и ее поглощение испытывают резкий скачок при $hf = 210$ м/с. Для объяснения экспериментальных зависимостей была разработана методика численного расчета, изложенная ниже.

3. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НЕВЯЗКОЙ И НЕПРОВОДЯЩЕЙ ЖИДКОСТИ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ВОЛНЫ A_0 В ТОНКИХ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПЛАСТИНАХ

3.1. Распространение волны A_0 в структуре "полубезграничная жидкость – пьезоэлектрическая пластина – вакуум"

На рис. 3 представлена геометрия рассматриваемой задачи. Волна распространяется вдоль

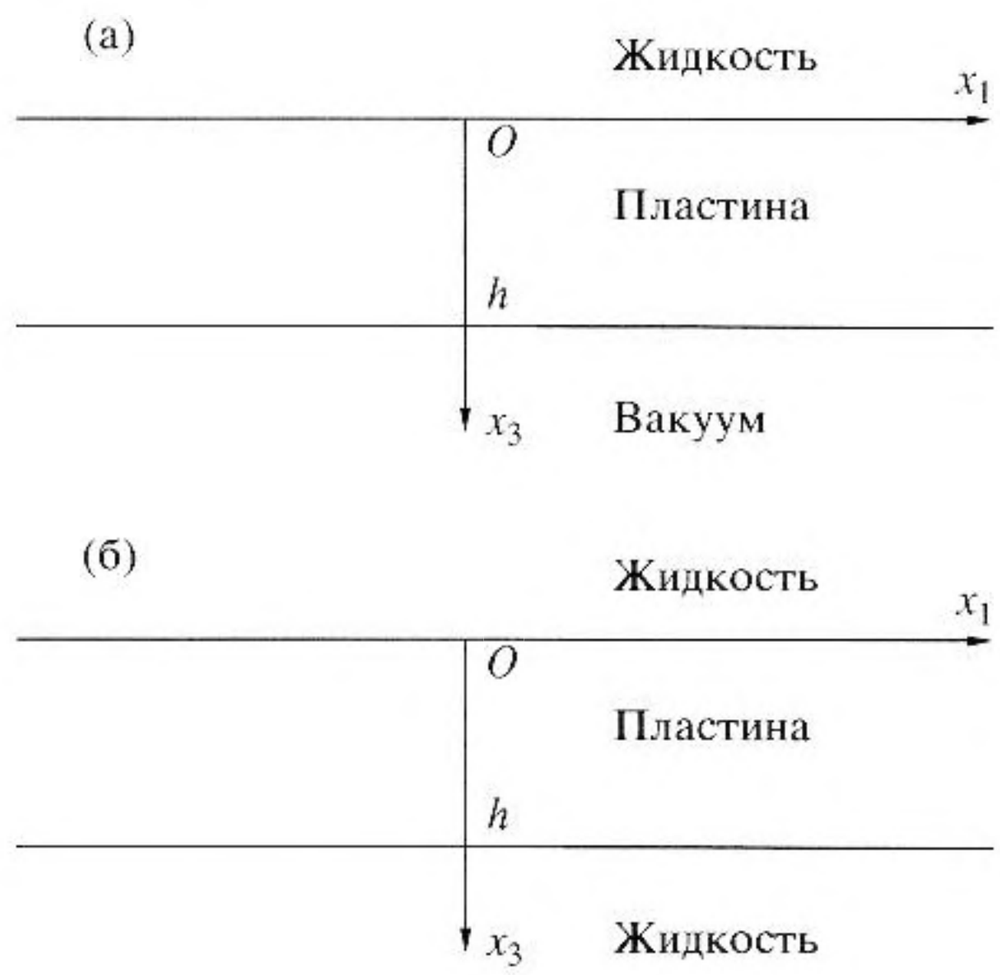

Рис. 3. Геометрия рассматриваемой задачи. Волна распространяется вдоль оси x_1.

оси x_1 пьезоэлектрической пластины, ограниченной плоскостями $x_3 = 0$ и $x_3 = h$. В областях $x_3 < 0$ и $x_3 > h$ расположены жидкость и вакуум, соответственно. Рассматривается двумерная задача, и в этом случае все механические и электрические переменные считаются постоянными в направлении оси x_2. Для решения данной задачи использовались уравнение движения, уравнение Лапласа и материальные уравнения для пьезоэлектрической среды [4, 11]:

$$\rho\partial^2 U_j/\partial t^2 = \partial T_{ij}/\partial x_j, \quad \partial D_j/\partial x_j = 0, \tag{2}$$

$$\begin{aligned} T_{ij} &= C_{ijkl}\partial U_l/\partial x_k + e_{kij}\partial\Phi/\partial x_k, \\ D_j &= -\varepsilon_{jk}\partial\Phi/\partial x_k + e_{jlk}\partial U_l/\partial x_k. \end{aligned} \tag{3}$$

Здесь U_i – компонента механического смещения частиц, t – время, T_{ij} – компонента тензора механического напряжения, x_j – координаты, D_j – компонента вектора электрической индукции, Φ – электрический потенциал, ρ, C_{ijkl}, e_{ikl} и ε_{jk} – плотность, упругие, пьезоэлектрические и диэлектрические постоянные пьезоэлектрика, соответственно.

За пределами пластины в области $x_3 > h$ электрическая индукция должна удовлетворять уравнению Лапласа

$$\partial D_j^V/\partial x_j = 0, \tag{4}$$

где $D_j^V = -\varepsilon_0\partial\Phi^V/\partial x_j$. Здесь индекс v обозначает величины, относящиеся к вакууму, а ε_0 – диэлектрическая постоянная вакуума.

Кроме того, необходимо записать уравнение движения, уравнение Лапласа и материальные

уравнения для непроводящей, невязкой и идеальной упругой жидкости в области $x_3 < 0$, которые имеют следующий вид [4, 12]:

$$\rho^{lq}\partial^2 U_i^{lq}/\partial t^2 = \partial T_{ij}^{lq}/\partial x_j, \quad \partial D_j^{lq}/\partial x_j = 0, \qquad (5)$$

$$T_{ij}^{lq} = C_{ijkl}^{lq}\partial U_l^{lq}/\partial x_k, \quad D_j^{lq} = -\varepsilon_{jk}^{lq}\partial\Phi^{lq}/\partial x_k. \qquad (6)$$

Здесь индекс lq означает принадлежность переменной к жидкости.

Акустические волны, распространяющиеся в пластине, должны также удовлетворять механическим и электрическим граничным условиям. На границе с вакуумом ($x_3 = h$) эти условия имеют следующий вид:

$$T_{3j} = 0, \quad \Phi^V = \Phi; \quad D_3^V = D_3. \qquad (7)$$

Что касается границы с невязкой, непроводящей и идеально упругой жидкостью ($x_3 = 0$), то в этом случае механические и электрические граничные условия можно записать как [13, 14]:

$$\begin{gathered} U_3^{lq} = U_3; \quad T_{33}^{lq} = T_{33}; \\ T_{13} = T_{23} = 0; \quad \Phi^{lq} = \Phi; \quad D_3^{lq} = D_3. \end{gathered} \qquad (8)$$

Указанная выше граничная задача решалась следующим методом. Решение представлялось в виде совокупности плоских неоднородных волн [11, 15] и имело вид:

$$Y_i(x_1, x_3, t) = Y_i(x_3)\exp[j\omega(t - x_1/V)], \qquad (9)$$

где $i = 1$–8 для пьезоэлектрика и жидкости, а для вакуума $i = 1, 2$; V – фазовая скорость, ω – круговая частота акустической волны. Здесь введены следующие нормированные переменные:

$$\begin{gathered} Y_i = \omega C_{11}^* U_i/V, \quad Y_4 = T_{13}, \quad Y_5 = T_{23}, \\ Y_6 = T_{33}, \quad Y_7 = \omega e^*\Phi/V, \quad Y_8 = e^* D_3/\varepsilon_{11}^*, \end{gathered} \qquad (10)$$

где $i = 1, 2, 3$; C_{11}^*, ε_{11}^* – нормировочные материальные постоянные пьезоэлектрической среды в кристаллофизической системе координат; $e^* = 1$ и имеет размерность пьезоэлектрической постоянной.

Подставляя выражение (9) в уравнения (2)–(6), получим две системы из 8-ми, и одну систему из 2-х обыкновенных дифференциальных линейных уравнений для пьезоэлектрической среды, жидкости и вакуума, соответственно. Каждую из этих систем можно записать в следующем матричном виде:

$$[A][dY/dx_3] = [B][Y]. \qquad (11)$$

Здесь $[dY/dx_3]$ и $[Y]$ – 8-мерные векторы для среды и жидкости и 2-мерные векторы для вакуума, компоненты которых определены в соответствии с формулами (10). Матрицы $[A]$ и $[B]$ – квадратные, размером 8×8 для пьезоэлектрической среды и жидкости, и размером 2×2 для вакуума.

Поскольку матрица $[A]$ не является особенной ($\det[A] \neq 0$), то для каждой контактирующей среды можно записать

$$[dY/dx_3] = [A^{-1}][B][Y] = [C][Y]. \qquad (12)$$

Далее для решения системы уравнений (12) необходимо найти собственные значения $\lambda^{(i)}$ матриц $[C]$ и соответствующие им собственные векторы $[Y^{(i)}]$, определяющие параметры парциальных волн, для каждой из контактирующих сред. Общее решение будет линейной комбинацией всех парциальных волн для каждой среды:

$$Y_k = \sum_{i=1}^{N} A_i Y_k^{(i)} \exp(\lambda^{(i)} x_3)\exp(i\omega[t - x_1/V]), \qquad (13)$$

где число собственных значений $N = 8$ для пьезоэлектрической среды и жидкости и $N = 2$ для вакуума, A_i – неизвестные пока величины. Для нахождения величин A_i и скорости V воспользуемся механическими и электрическими граничными условиями (7)–(8), которые также были записаны в нормированном виде с учетом (10). Как известно, [15] в случае пьезоэлектрической пластины в рассмотрение принимаются все 8 собственных значений соответствующей матрицы $[C]$. Для вакуума, расположенного в области $x_3 > h$, собственные значения соответствующей матрицы $[C]$ с отрицательной действительной частью исключим из рассмотрения, поскольку все переменные в вакууме должны иметь убывающую амплитуду при удалении от пластины. Для жидкости, расположенной в области $x_3 < 0$, собственные значения матрицы $[C]$, соответствующие электрическим переменным, с положительной действительной частью также исключим из рассмотрения. Что касается механических переменных, то при распространении волны A_0 в подобной структуре, вопрос о выборе нарастающих или убывающих в глубь жидкости решений оставался неопределенным и требовал отдельного анализа.

В результате применения описанного метода определялись фазовая скорость волны и амплитуды всех электрических и механических переменных в зависимости от координаты x_3.

В данной статье было уточнено правило выбора собственных значений, соответствующих механическим переменным в жидкости, на примере распространения волны A_0 в структуре "дистиллированная вода – пластина 128YX ниобата лития – вакуум". Материальные постоянные для ниобата лития были взяты из [16], а для воды из [17].

В результате теоретического анализа были найдены зависимости скорости и затухания волны A_0 в указанной выше структуре от параметра hf для двух случаев выбора собственных значе-

ний, соответствующих нарастающим и убывающим в глубь жидкости решениям. Эти зависимости представлены на рис. 4 для скорости (а) и затухания (б) волны A_0. Кривые *1* соответствуют нарастающим в глубь жидкости решениям, а кривые *2* – убывающим решениям. Из рис. 4 видно, что в присутствии излучения в жидкость (кривая *1*) скорость волны A_0 монотонно увеличивается с ростом параметра hf. Что касается скорости волны A_0 при отсутствии излучения в жидкость (кривая *2*), то она увеличивается с ростом hf и достигает насыщения при $hf > 300$ м/с, оставаясь при этом чуть меньше скорости ОАВ в жидкости. Видно, что зависимость затухания от параметра hf в первом случае (кривая *1*) является монотонно убывающей, а во втором случае (кривая *2*) затухание отсутствует во всей области параметра hf. Было также найдено то значение параметра $(hf)_0$, при котором значение скорости на кривой *1* в точности равно скорости ОАВ в жидкости. Это значение параметра, равное $(hf)_0 = 210$ м/с, отмечено на рис. 4 вертикальной пунктирной линией. На рис. 4 точками показаны также результаты экспериментального исследования, проведенного в п. 2. Видно, что в области $(hf) > (hf)_0$ экспериментальные точки находятся в хорошем соответствии с теоретическими зависимостями, соответствующими выбору нарастающих в глубь жидкости решений. Что касается области $(hf) < (hf)_0$, то эксперимент показывает отсутствие затухания, что соответствует выбору убывающих в глубь жидкости решений. Таким образом, сравнение результатов теоретического анализа с экспериментальными данными позволило построить обобщенные теоретические зависимости скорости и затухания исследуемой волны от параметра hf. Эти зависимости представлены сплошными линиями на рис. 2а и 2б, соответственно. При $hf < (hf)_0$ обобщенные зависимости скорости и затухания соответствуют кривым *2* (рис. 4), при $hf > (hf)_0$ кривым *1* (рис. 4). При $hf = (hf)_0$ происходит скачок с кривых *2* на кривые *1* (рис. 2). Таким образом, фазовая скорость волны A_0 в исследуемой структуре увеличивается с ростом толщины пластины и претерпевает скачок в области изменения правила выбора собственных значений $(hf)_0 = 210$ м/с, что соответствует экспериментальным результатам. Что касается затухания, то с уменьшением толщины пластины затухание волны A_0 увеличивается, достигает максимума и затем исчезает.

На основании проведенного анализа можно предложить следующую методику расчета зависимости характеристик волн A_0 в пластинах, граничащих с невязкой, непроводящей и идеально упругой жидкостью, от параметра hf. При уменьшении hf и при выполнении условия $V > V_{lq}$ необходимо использовать условие нарастания амплитуд механических переменных вглубь жидкости. Как только величина скорости волны A_0 становится равной скорости ОАВ в жидкости $(hf) = (hf)_0$, необходимо изменить правило выбора собственных значений и использовать условие убывания амплитуд механических переменных в глубь жидкости. Расчет показал, что в исследуемой структуре $(hf)_0 = 210$ м/с.

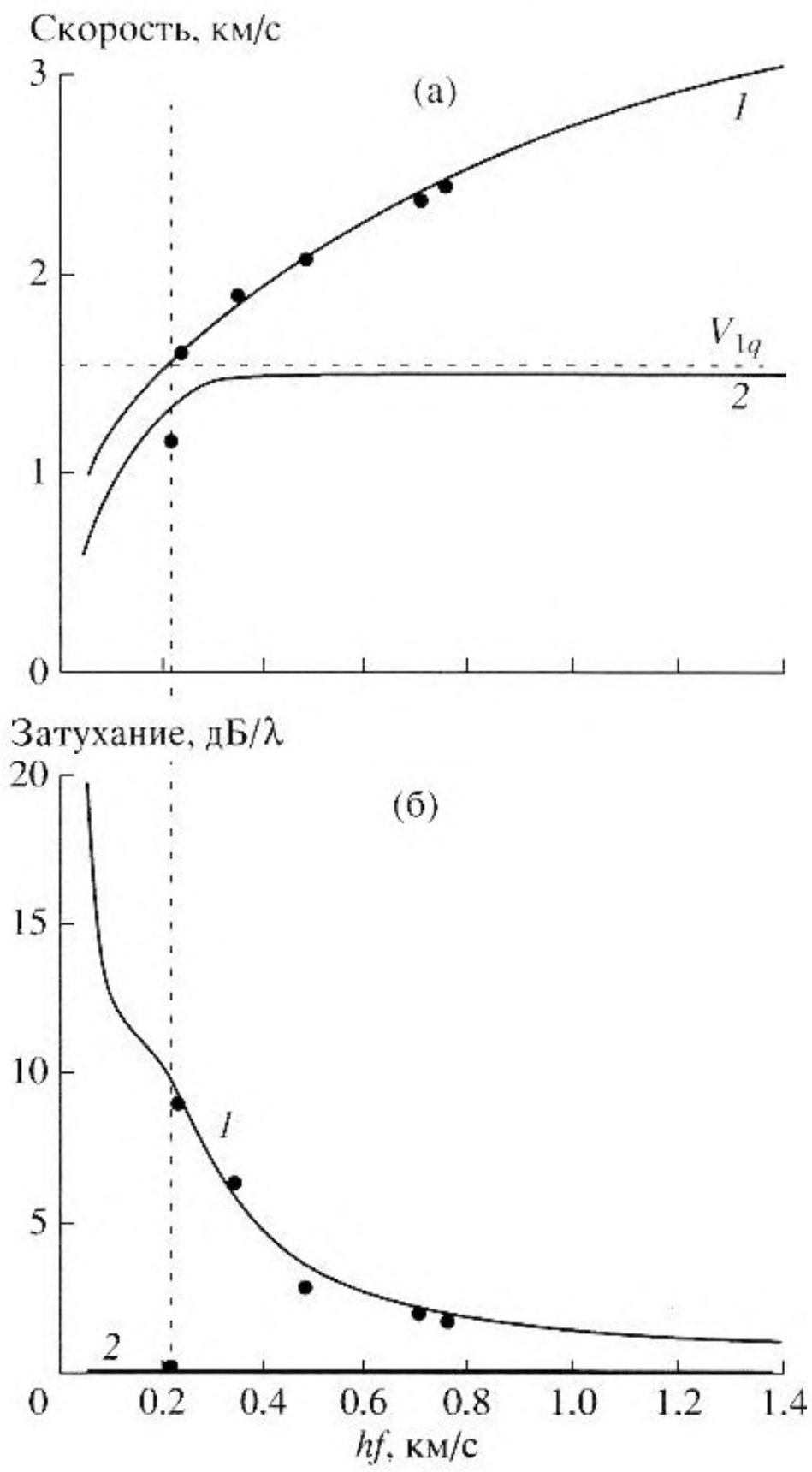

Рис. 4. Зависимости скорости (а) и затухания (б) волны A_0 в структуре "дистиллированная вода – пластина 128YX $LiNbO_3$ – вакуум" от параметра hf при различных правилах выбора поведения амплитуд механических переменных в глубь жидкости: *1* – все амплитуды нарастают, *2* – все амплитуды убывают. Горизонтальная пунктирная линия соответствует скорости ОАВ в воде (V_{lq}). Вертикальной пунктирной линией отмечено значение hf, при котором $V = V_{lq}$. Точки – экспериментальные данные.

3.2. Распространение волны A_0 в структуре "жидкость I – пьзоэлектрическая пластина – жидкость II"

Хорошее совпадение теоретических результатов с экспериментальными для случая, когда пьезоэлектрическая пластина нагружена жидкостью

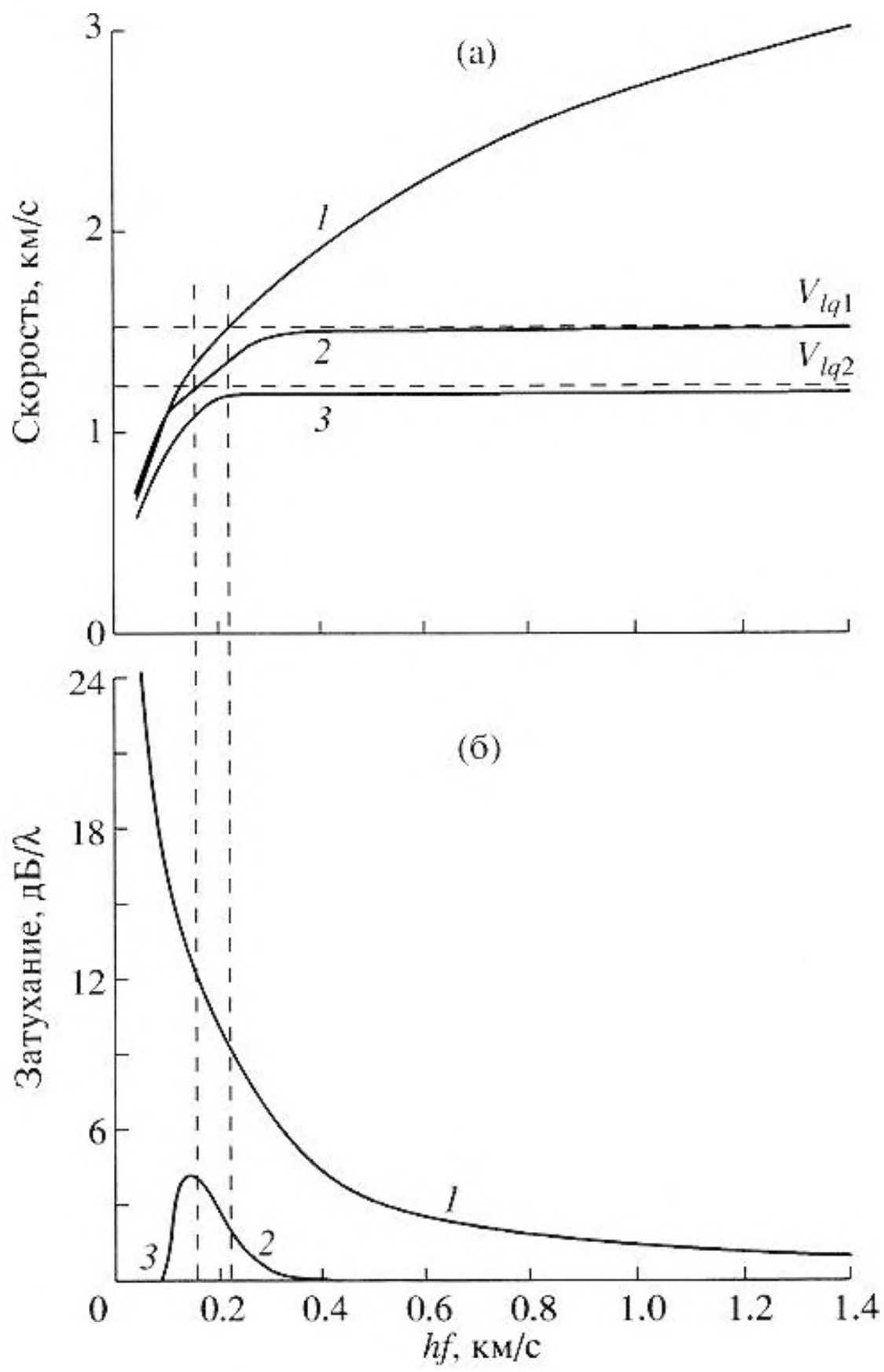

Рис. 5. Зависимости скорости (а) и затухания (б) волны A_0 в структуре "дистиллированная вода – пластина 128YX $LiNbO_3$ – ацетон" от параметра hf при различных правилах выбора поведения амплитуд механических переменных в глубь жидкости: *1* – амплитуды в обе жидкости нарастают, *2* – амплитуда в ацетоне нарастает, а в воде убывает, *3* – амплитуды в обе жидкости убывают. Горизонтальные пунктирные линии соответствуют скорости ОАВ в воде (V_{lq1}) и ацетоне (V_{lq2}). Вертикальными пунктирными линиями отмечены значения hf, при которых $V = V_{lq1}$ и $V = V_{lq2}$.

только с одной ее стороны, позволило применить ту же методику и для более общего случая, когда пластина разделяет две разные невязкие, непроводящие и идеально упругие жидкости. В качестве примера проанализируем структуру "дистиллированная вода (I) – пластина128YX $LiNbO_3$ – ацетон (II)" (рис. 3б). Данные для ацетона были взяты из [17].

В этом случае для решения задачи использовались уравнения (2)–(6) и граничные условия (8) в плоскостях $x_3 = 0$ и $x_3 = h$. Задача решалась методом, описанным в п. 3.1.

В соответствии с вышеуказанной методикой выбора нарастающих или убывающих решений в глубь жидкости, были построены зависимости скорости (а) и затухания (б) волны A_0 в данной структуре от параметра hf, которые приведены на рис. 5. Кривая *1* соответствует условию нарастания амплитуд механических переменных в глубь обеих жидкостей; для кривой *2* использовано условие нарастания и убывания амплитуд этих переменных в глубь ацетона и воды, соответственно; кривая 3 соответствует условию убывания амплитуд механических переменных в глубь обеих жидкостей. Были также найдены те значения параметра $(hf)_{01}$ и $(hf)_{02}$, при которых значения скоростей на кривых *1* и *2*, соответственно, в точности равнялось скоростям ОАВ в воде и ацетоне. Эти значения параметра, равные $(hf)_{01} = 210$ м/с и $(hf)_{02} = 140$ м/с, отмечены на рис. 5 вертикальными пунктирными линиями.

На основании этих данных были построены обобщенные зависимости скорости (а) и затухания (б) волны A_0 от параметра hf, которые представлены на рис. 6. Видно, что скорость волны A_0 увеличивается с ростом толщины пластины и дважды претерпевает скачок в области изменения правила выбора собственных значений для соответствующих жидкостей. Что касается зависимости затухания от параметра hf, то здесь наблюдаются два ярко выраженных максимума. Очевидно, что расстояние между этими максимумами тем больше, чем сильнее различаются механические свойства соответствующих жидкостей.

Таким образом, для построения реальных зависимостей скорости и затухания волны A_0 в пьезоэлектрической пластине, разграничивающей два типа жидкости, можно использовать следующую методику. При уменьшении hf и при выполнении условия $V > V_{lqI}$ необходимо использовать условие нарастания амплитуд механических переменных в глубь обеих жидкостей. Как только величина скорости волны A_0 становится равной скорости ОАВ в жидкости I, то необходимо изменить правило выбора собственных значений и использовать условие нарастания амплитуд в глубь жидкости II и убывание амплитуд в глубь жидкости I. При дальнейшем уменьшении hf скорость волны A_0 становится равной скорости ОАВ в жидкости II и в этом случае снова необходимо изменить правило выбора собственных значений, которое заключается в использовании условия убывания амплитуд механических переменных в глубь обеих жидкостей. Проведенный анализ показал, что в исследуемой структуре правило выбора собственных значений необходимо изменять при величине параметра $hf = 210$ м/с на границе с водой и $hf = 140$ м/с на границе с ацетоном.

Полученные результаты также показывают возможность разработки экспресс идентификаторов жидкости на основе волн A_0 в пьезоэлектрических пластинах. В этом случае с одной стороны пла-

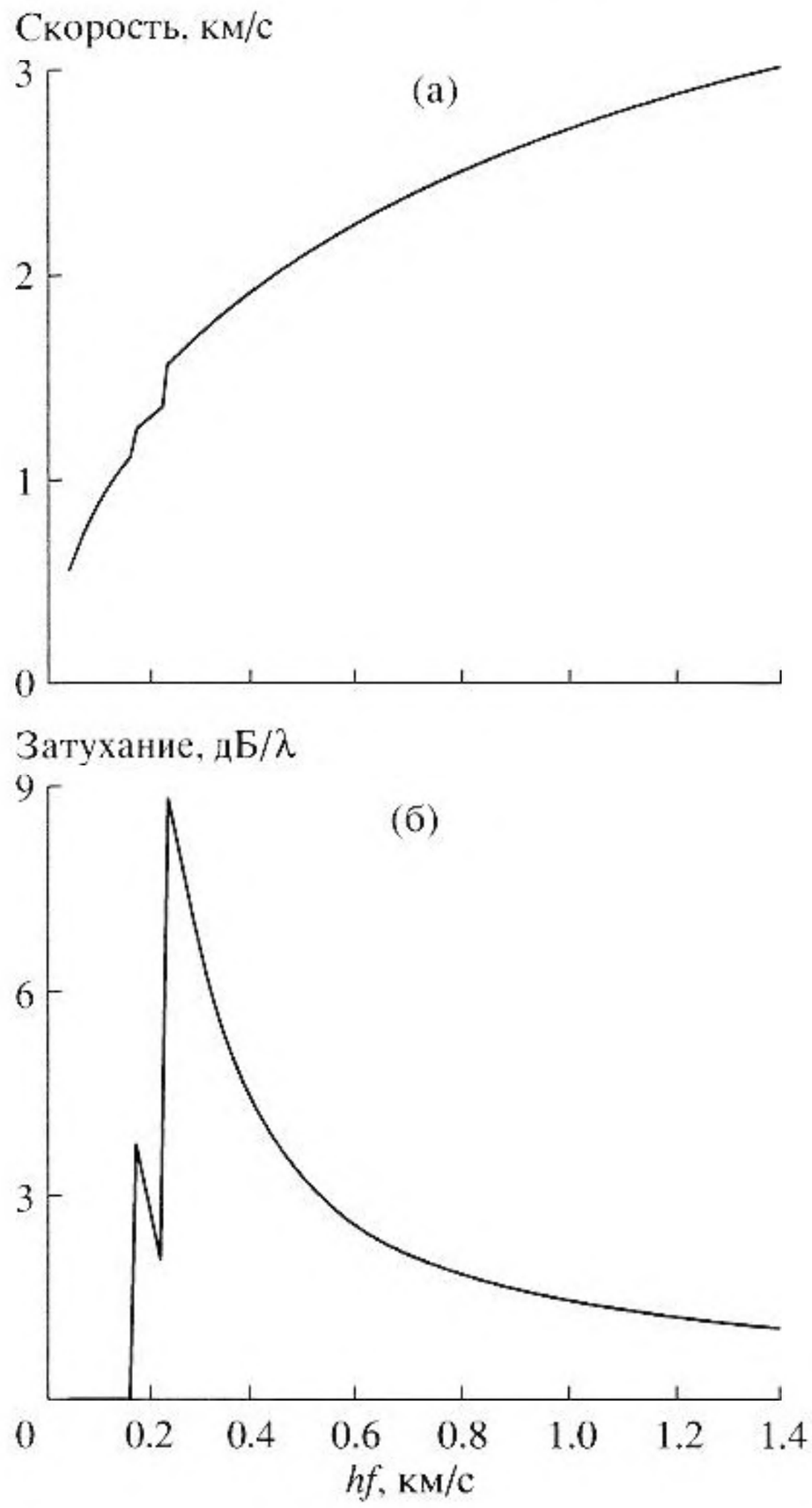

Рис. 6. Обобщенные теоретические зависимости скорости (а) и затухания (б) волны A_0 в структуре "дистиллированная вода – пластина 128YX $LiNbO_3$ – ацетон" от параметра *hf*.

стины располагается эталонная жидкость, а с другой ее стороны размещается идентифицируемая жидкость. Если при изменении частоты наблюдается лишь один максимум затухания, то эти жидкости – идентичны. В противоположном случае эти жидкости – различны. Подобные датчики могут быть полезными при определении качества различных пищевых и бытовых жидкостей.

4. ВЫВОДЫ

На основе сопоставления теоретических данных с экспериментальными разработана методика расчета скорости и затухания акустической антисимметричной волны Лэмба A_0 нулевого порядка в тонкой по сравнению с длиной волны пьезоэлектрической пластине, граничащей с невязкой, непроводящей и идеально упругой жидкостью. Методика заключается в изменении условия выбора нарастающих или убывающих в глубь жидкости амплитуд механических переменных в зависимости от параметра hf (h – толщина пластины, f – частота волны) и соотношения величин скоростей волны A_0 и OAB в жидкости. На примере волны A_0 в пластине 128YX $LiNbO_3$, нагруженной с одной стороны дистиллированной водой, показано, что при $hf < 210$ м/с необходимо выбирать условие убывания амплитуды механических переменных в жидкость, а при $hf > 210$ м/с эти амплитуды должны нарастать, что соответствует излучению объемной акустической волны в жидкость. При контакте этой пластины с одной стороны с водой, а с другой стороны – с ацетоном правила выбора собственных значений должны меняться при величине параметра $hf = 210$ м/с на границе с водой и $hf = 140$ м/с на границе с ацетоном. Предложено использовать особенности затухания волны A_0 при контакте с двумя жидкостями для экспресс-анализа их идентичности. При этом если жидкости различаются, то на зависимости затухания от параметра hf должны наблюдаться два максимума, а при их идентичности будет регистрироваться лишь один максимум.

Авторы выражают благодарность И. Кужбаевой за помощь в проведении расчетов.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 05-02-16947а, 06-08-01011а, гранта программы "Поддержка развития Высшей школы 2006–2008 гг." РНП.2.1.1.8014.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ballantine D.S., White R.M., Martin S.J., Ricco A.J., Zellers E.T., Frye G.C., Wohltjen H.* Acoustic Wave Sensors. San Diego: Academic Press, 1997. 436 p.
2. *Schweyer M.G., Andle J.C., McAlister D.J., French L.A., Vetelino J.F.* An acoustic plate mode sensor for aqueous mercury / Proc. of IEEE Int. Ultras. Symp. 1996. P. 355–358.
3. *Anisimkin I.V., Gulyaev Yu.V.* Acoustic wave liquid sensing: features, tendencies, perspectives / Proc. 17th International Congress on Acoustics. 2001. V. IV. P. 90–91.
4. *Zaitsev B.D., Joshi S.G., Kuznetsova I.E., Borodina I.A.* Acoustic waves in piezoelectric plates bordered with viscous and conductive liquids // Ultrasonics. 2001. V. 39. № 1. P. 45–50.
5. *White R.M., Wicher P.J., Wenzel S.W., Zellers E.T.* Plate-mode ultrasonic oscillator sensors // IEEE Trans. on Ultrason., Ferroel. and Freq. Contr. 1987. V. 34. № 2. P. 162–171.
6. *Watkins R.D., Cooper W.H.B., Gillespie A.B., Pike R.B.* The attenuation of Lamb waves in the presence of a fluid // Ultrasonics. 1982. V. 20. P. 257–264.
7. *Joshi S.G., Zaitsev B.D., Kuznetsova I.E.* Miniature, high efficiency transducers for use in ultrasonic flow meter / Proc. of IEEE Int. Ultras. Symp. 2004. P. 1286–1289.
8. *Wu J., Zhu Z.* Sensitivity of Lamb wave sensors in liquid sensing // IEEE Trans. on Ultrason., Ferroel. and Freq. Contr. 1996. V. 43. № 1. P. 71–72.

9. *Scandelari L., Noury N., Benech P., Chamberod E.* A sensor for liquids characterization based on elastic surface waves generated with a $P(VF_2–VF_3)$ film in a non-piezoelectric media // Ultrasonics. 1998. V. 36. P. 15–20.

10. *Бородина И.А., Джоши С.Г., Зайцев Б.Д., Кузнецова И.Е.* Акустические волны в тонких пластинах ниобата лития // Акуст. журн. 2000. Т. 46. № 1. С. 42–46.

11. Поверхностные акустические волны / Под. ред. А. Олинера. М.: Мир, 1981. Гл. 2. 390 с.

12. *Бреховских Л.М., Годин О.А.* Акустика слоистых сред. М.: Наука, 1989. 412 с.

13. *Campbell J.J., Jones W.R.* Propagation of surface waves at the boundary between a piezoelectric crystal and a fluid medium// IEEE Trans. on Ultrason., Ferroel. and Freq. Contr. 1970. V. 17. № 2. P. 71–76.

14. *Zaitsev B.D., Kuznetsova I.E., Joshi S.G., Kuznetsova A.S.* New method of change in temperature coefficient delay of acoustic waves in thin piezoelectric plates // IEEE Trans. on Ultrason. Ferroel. and Freq. Contr. 2006. V. 53. № 11. P. 2113–2120.

15. *Joshi S.G., Jin Y.* Propagation of ultrasonic Lamb waves in piezoelectric plates // J. of Appl. Phys. 1991. V. 70. № 8. P. 4113–4120.

16. *Kovacs G., Anhorn M., Engan H.E., Visintini G., Ruppel C.C.W.* Improved material constants for $LiNbO_3$ and $LiTaO_3$ // Proc. IEEE Ultrasonics Symp. 1990. V. 1. P. 435–438.

17. Физические величины. Справочник / Бабичев А.П., Бабушкина Н.А., Братковский А.М. и др. М.: Энергоатомиздат, 1991. 1232 с.

Effect of a Liquid on the Characteristics of Antisymmetric Lamb Waves in Thin Piezoelectric Plates

I. E. Kuznetsova[a], B. D. Zaitsev[a], S. G. Joshi[b], and A. A. Teplykh[a]

[a] *Institute of Radio Engineering and Electronics, Russian Academy of Sciences, Saratov Branch, ul. Zelenaya 38, Saratov, 410019 Russia*

e-mail: kuziren@yandex.ru

[b] *Department of Electrical and Computer Engineering, Marquette University, Milwaukee, WI 53201-1881, USA*

Received February 20, 2006

Abstract—The effect of a perfectly elastic nonviscous nonconducting liquid on the characteristics of a zero-order antisymmetric Lamb wave (the A_0 wave) in a 128YX $LiNbO_3$ plate, whose thickness is small compared to the wavelength, is studied both theoretically and experimentally. A method for calculating the velocity and attenuation of this wave depending on the value of the parameter hf (h is the plate thickness and f is the wave frequency) is proposed. In addition, the characteristics of an A_0 wave in a piezoelectric plate that is in contact with two different perfectly elastic nonviscous nonconducting liquids on its two sides are investigated. A possibility for the development of a proximate analyzer of liquids on the basis of such a structure is indicated.