

УДК 534.8; 534.232

**ХАРАКТЕРИСТИКИ АНТИСИММЕТРИЧНЫХ ВОЛН ЛЭМБА
НУЛЕВОГО ПОРЯДКА В СТРУКТУРЕ «ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ
ПЛАСТИНА – НАНОКОМПОЗИТНЫЙ ПОЛИМЕРНЫЙ СЛОЙ –
ЖИДКОСТЬ»**

**И. Е. Кузнецова¹, Б. Д. Зайцев², И. А. Бородина², А. М. Шихабудинов²,
А. С. Кузнецова², А. А. Теплых²**

¹**Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН**

²**Саратовский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова
РАН**

Получена 25 июля 2012 г.

Аннотация. В работе исследовано влияние нанокompозитного полимерного слоя на величину радиационного излучения, сопровождающего распространение антисимметричной волны Лэмба нулевого порядка (A_0) в пьезоэлектрической пластине, граничащей с жидкостью. Показано, что использование согласующего слоя приводит к увеличению эффективности излучения объемной волны в жидкость при распространении A_0 волн. Проведена оптимизация акустических характеристик согласующего материала и геометрических размеров структуры. Полученные экспериментальные данные подтвердили основные выводы теории. Данные структуры могут быть использованы при разработке волноводных гидроакустических излучателей.

Ключевые слова: нанокompозитные полимерные материалы, волны Лэмба, пьезоэлектрические пластины, гидроакустические излучатели.

Abstract: In the paper the influence of the nanocomposite polymeric layer on value of radiation losses accompanying the propagation of antisymmetric Lamb wave in piezoelectric plate bordering with liquid is investigated. It is shown that the using of matching layer leads to the increasing of effectiveness of bulk wave radiation into liquid

at the propagation of A_0 wave. The optimization of the acoustical characteristics of matching layer and the geometry of the structure is carried out. The obtained theoretical data are confirmed by the experimental results. The presented structures can be useful for the development of the waveguide hydroacoustic emitters.

Key words: nanocomposite polymeric material, Lamb waves, piezoelectric plates, hydroacoustic emitters.

Введение

В настоящее время известно большое количество 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 вглубь 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 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 A_0 волны 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 A_0 волны в изотропных пластинах показало, что затухание A_0 волны возникает при $V_{lq} = V$ и с увеличением параметра hf оно уменьшается. Поскольку скорость A_0 волны 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 вышперечисленных режимов.

Известны работы, в которых этот факт экспериментально подтвержден [6, 11]. Здесь же приводится описание методики расчета указанных волн как для случая контакта пластины с жидкостью только с одной стороны, так и для случая контакта - с обеих сторон. Таким образом, характеристики указанных волн, распространяющихся в пьезопластинах, граничащих с жидкостью, достаточно хорошо изучены.

С другой стороны, проведенные ранее исследования показали, что нанокompозитные полимерные материалы на основе матрицы полиэтилена высокого давления с внедренными в нее наночастицами металлов и их оксидов характеризуются более низким акустическим импедансом, чем известные пьезоэлектрические кристаллы [12]. Следовательно, можно предположить, что использование этих материалов в качестве согласующих слоев между пьезоэлектрическим излучателем и жидкостью приведет к увеличению эффективности излучения A_0 волны в жидкость.

К настоящему времени работы, посвященные данной проблеме, отсутствуют. В связи с вышесказанным в данной статье приводятся результаты теоретического и экспериментального исследования характеристик A_0 волн в структуре «пьезопластина– нанокompозитный слой – жидкость».

2. Основные уравнения и граничные условия

Геометрия задачи представлена на рис. 1. Волна распространяется вдоль оси x_1 пьезоэлектрической пластины, ограниченной плоскостями $x_3 = 0$ и $x_3 = h$. Нанокompозитная полимерная пленка расположена между плоскостями $x_3 = 0$ и $x_3 = -d$. Предполагается, что указанная пленка является вязкой, непроводящей и изотропной. В областях $x_3 < -d$ и $x_3 > h$ находятся жидкость и вакуум, соответственно. Мы рассматриваем двумерную задачу, в которой все компоненты

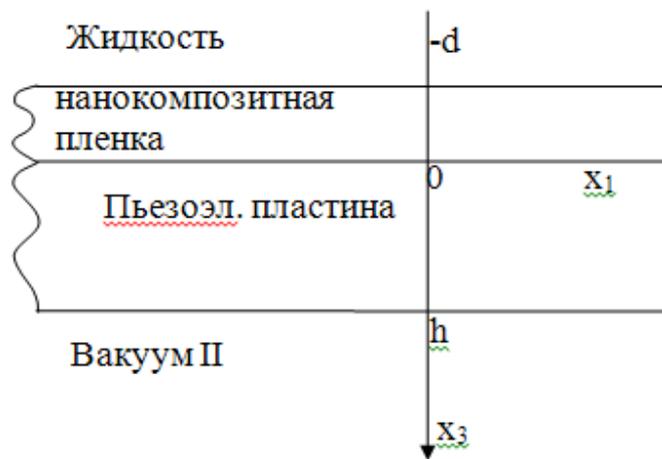


Рис. 1. Геометрия задачи.

поля являются постоянными в направлении x_2 . Для анализа распространения волны будем использовать уравнение движения, уравнение Лапласа и материальные уравнения для пьезоэлектрической среды, полимерной пленки и жидкости [13-15]:

$$\rho \partial^2 U_i / \partial t^2 = \partial T_{ij} / \partial x_j, \quad \partial D_j / \partial x_j = 0, \quad (1)$$

$$T_{ij} = C_{ijkl} \partial U_l / \partial x_k + e_{kij} \partial \Phi / \partial x_k, \quad (2)$$

$$D_j = -\varepsilon_{jk} \partial \Phi / \partial x_k + e_{jlk} \partial U_l / \partial x_k, \quad (3)$$

$$\rho^f \partial^2 U_i^f / \partial t^2 = \partial T_{ij}^f / \partial x_j, \quad \partial D_j^f / \partial x_j = 0, \quad (4)$$

$$T_{ij}^f = C_{ijkl}^f \partial U_l^f / \partial x_k + \eta_{ijkl}^f \partial U_l^f / \partial t \partial x_k, \quad (5)$$

$$D_j^f = -\varepsilon_{jk}^f \partial \Phi^f / \partial x_k . \quad (6)$$

$$\rho^{lq} \partial^2 U_i^{lq} / \partial t^2 = \partial T_{ij}^{lq} / \partial x_j , \quad \partial D_j^{lq} / \partial x_j = 0 \quad (7)$$

$$T_{ij}^{lq} = C_{ijkl}^{lq} \partial U_l^{lq} / \partial x_k , \quad D_j^{lq} = -\varepsilon_{jk}^{lq} \partial \Phi^{lq} / \partial x_k . \quad (8)$$

Здесь U_i – компоненты механического смещения частиц; t – время; T_{ij} – компоненты механического напряжения; x_j – координата; D_j – компоненты электрической индукции; Φ – электрический потенциал; ρ – плотность; C_{ijkl} , η_{ijkl} , e_{ikl} и ε_{jk} – упругие, вязкие, пьезоэлектрические и диэлектрические постоянные, соответственно. Индексы f и lq означают принадлежность переменной к полимерной нанокомпозитной пленке или к жидкости, соответственно. Поскольку рассматриваемая нанокомпозитная пленка является вязкоупругой, то из уравнения (5) следует, что ее модули упругости являются комплексными и их мнимая часть равна $\omega \eta_{ijkl}$ для гармонических волн.

В области, занятой вакуумом, электрическая индукция должна удовлетворять уравнению Лапласа:

$$\partial D_j^V / \partial x_j = 0, \quad (9)$$

где $D_j^V = -\varepsilon_0 \partial \Phi^V / \partial x_j$. Здесь ε_0 – диэлектрическая проницаемость вакуума, индекс v означает, что величины относятся к вакууму.

Акустические волны, распространяющиеся в вышеуказанной структуре должны удовлетворять механическим и электрическим граничным условиям:

$$x_3 = -d: U_3^{lq} = U_3^f ; \quad T_{33}^{lq} = T_{33}^f ; \quad T_{13}^f = T_{23}^f = 0 ; \quad \Phi^{lq} = \Phi^f ; \quad D_3^{lq} = D_3^f . \quad (10)$$

$$x_3 = 0: U_i^f = U_i ; \quad T_{i3}^f = T_{i3} ; \quad \Phi^f = \Phi ; \quad D_3^f = D_3 ; \quad (11)$$

$$x_3 = h: T_{i3} = 0 ; \quad \Phi = \Phi^{II} ; \quad D_3 = D_3^{II} . \quad (12)$$

Здесь $i=1\div 3$, d и h – значения толщины нанокомпозитной пленки и пьезоэлектрической пластины, соответственно.

В расчетах использовались материальные постоянные ниобата лития, нанокompозитных полимерных материалов, содержащих наночастицы CdS и Fe, а также воды, взятые из [16], [12] и [17], соответственно.

3. Результаты теоретического анализа

В результате проведенных расчетов были получены зависимости скорости и затухания на длину волны от отношения толщин пленки и пластины для A_0 волны в структуре «пластина 128YX LiNbO_3 – нанокompозитная пленка - жидкость». На рис. 2 в качестве примера приведены зависимости скорости (а) и затухания (б) A_0 волны от отношения d/h для концентрации наночастиц CdS в полимерной пленке 30% при параметре $hf = 650$ м/с (кривая 1). Для сравнения на этом же рисунке приведены аналогичные зависимости для структуры «пластина 128YX LiNbO_3 – нанокompозитная пленка с CdS 30%» (кривая 2). Кроме того, здесь же приведены величины скорости и затухания A_0 волны в структуре «пластина 128YX LiNbO_3 – жидкость» (кривая 3).

Видно, что как в присутствии жидкости, так и при ее отсутствии при определенных соотношениях толщин пленки и пластины возникает резонансное затухание акустической волны. Это объясняется тем, что если пленка с одной стороны механически свободна, а с другой стороны механически закреплена, то такая пленка резонирует в том случае, если ее толщина равна $n\lambda/4$ [18] (λ = длина волны, n = нечетное число). Это соответствует нашему случаю, поскольку импеданс пластины значительно превышает импеданс нанокompозитного слоя, и в плоскости $x_3=0$ слой можно считать механически зажатым. Видно также, что с увеличением отношения d/h затухание уменьшается, и его величина становится постоянной, начиная с какого-то критического значения d/h . Было установлено, что величина этого критического значения зависит от концентрации наночастиц в полимерной матрице. Что касается скорости исследуемых волн, то ее зависимость от отношения d/h вблизи резонансной толщины коррелирует с аналогичным

поведением фазы колебания резонатора вблизи резонансной частоты. С увеличением отношения d/h скорость A_0 волны также стремится к постоянной величине.

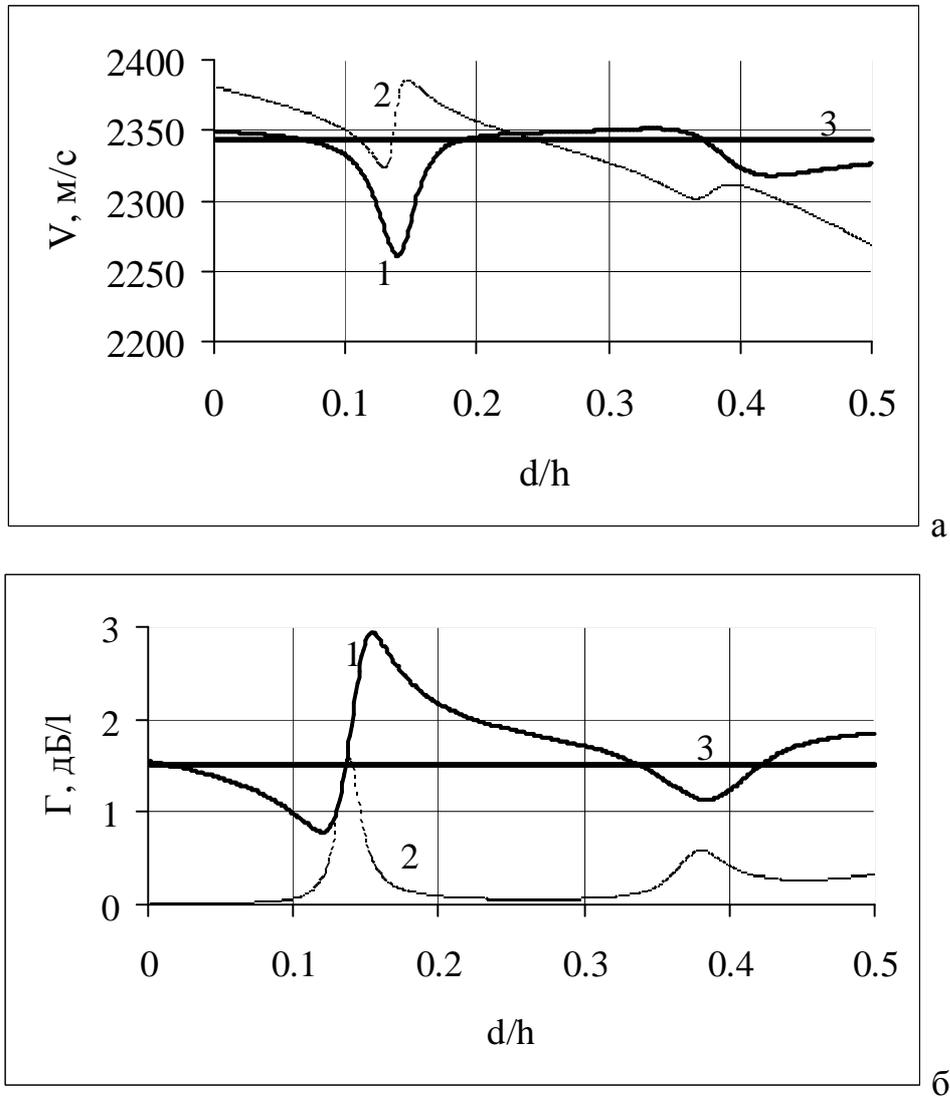


Рис. 2. Зависимости скорости (а) и затухания (б) A_0 волны от отношения d/h в структуре «пластина – нанокompозитная пленка - жидкость» при параметре $hf = 650$ м/с (1) и в структуре «пластина – нанокompозитная пленка» (2). Значения скорости и затухания A_0 волны в структуре «пластина – жидкость» (3).

Анализ полученных результатов показал, что в случае использования в качестве промежуточного слоя нанокompозитного полимерного материала на основе матрицы полиэтилена высокого давления с наночастицами сульфида

кадмия 30% возможно достичь улучшения эффективности излучения на ~1 дБ/λ по мощности при соотношении толщин слоя и пластины $d/h=0.154$ при $f=1.3$ МГц. В самом деле, как уже говорилось выше, затухание для A_0 волны в структуре «128ҮХ пластина-жидкость» при $hf=650$ м/с составляет 1.4 дБ/λ (радиационное затухание Γ_2). При наличии нанокompозитного слоя с 30% концентрацией наночастиц CdS и с толщиной $d/h = 0.154$ затухание становится равным 2.9 дБ/λ (Γ_3). Если учесть, что полимерный слой за счет своей вязкости приводит к возникновению затухания (Γ_1) A_0 волны, величина которого составляет 0.46 дБ/λ, то выигрыш по радиационному затуханию составляет $(\Gamma_3 - \Gamma_2 - \Gamma_1) \approx 1$ дБ/λ.

Таблица 1 – Характеристики A_0 волны в структуре «128ҮХ пластина ниобата лития – нанокompозитный слой – жидкость» при $hf=650$ м/с и $f=1.3$ МГц

Конц. н/част, %	d_f , мкм	Γ_3 , дБ/λ	d/h	V , м/с	α , град	Γ_1 , дБ/λ	$(\Gamma_3 - \Gamma_2 - \Gamma_1)$, дБ/λ
0	58.5	2.6	0.117	2297.02	49.1	0.05	1.15
Fe							
2	132	5.8	0.264	2256	48.3	5	-0.6
7	146	3.8	0.292	1873	36.7	3.2	-0.8
12	143	2.5	0.287	1804	38.3	1.9	-0.8
17	128	3.8	0.256	1799	33.4	3.1	-0.7
20	126	5.1	0.251	2315	49.6	2.6	1.1
25	130	4.7	0.259	1678	26.5	0.7	2.6
CdS							
5	76.5	2.1	0.153	2310.2	49.4	0.22	0.5
10	109.5	3.6	0.219	2268.56	48.5	4.42	-2.2
30	77	2.9	0.154	2300.99	49.25	0.46	1.0

В таблице 1 приведены данные расчетов для структур с нанокompозитными материалами, содержащими различную концентрацию CdS и Fe при $hf=650$ м/с и $f=1.3$ МГц.

Видно, что в случае использования других типов наночастиц с различными концентрациями эффективность излучения в жидкость может быть увеличена еще больше. Например, при использовании пленок с наночастицами железа 25% затухание может составить $\Gamma_3 = 4.7$ дБ/λ при $d/h=0.259$. При этом затухание в присутствии вышеуказанной нанокompозитной пленки без жидкости составляет $\Gamma_1 = 0.7$ дБ/λ и выигрыш $\Gamma_3 - \Gamma_2 - \Gamma_1 = 2.6$ дБ/λ.

4. Результаты экспериментального исследования

Для проверки теоретического вывода о том, что присутствие слоя из нанокompозитного материала на основе полиэтилена высокого давления на поверхности звукопровода, по которому распространяется антисимметричная волна A_0 , может привести к увеличению эффективности излучения акустической волны в жидкость, был создан специальный измерительный прибор, схема которого представлена на рис. 3. Этот прибор состоял из излучателя 1 и приемника 2, расположенных на расстоянии h друг от друга и смещенных на расстояние L , так чтобы угол α удовлетворял условию $\cos\alpha = V_1/V_2$. Здесь V_1 – скорость акустической волны в жидкости, V_2 – скорость A_0 волны. Излучатель представлял собой пластину ниобата лития 128 Y –среза с поперечными размерами 25×25 мм² толщиной 0.5 мм [19]. На нижней стороне этой пластины методом фотолитографии был нанесен встречно-штыревой преобразователь (ВШП), состоящий из 5 пар штырей с апертурой 15 мм и периодом 2 мм. Этот преобразователь возбуждал антисимметричную волну нулевого порядка A_0 на частоте ~ 1.3 МГц, распространяющуюся вдоль кристаллографической оси X. При контакте верхней стороны пластины с жидкостью A_0 волна излучала объемную акустическую волну в жидкость под указанным выше углом. Для компенсации

емкости ВШП и согласования с подводимым кабелем использовались индуктивность 47 мкГн и согласующий трансформатор 1:25, соответственно. Пластина приклеивалась к специальному герметичному корпусу, который предохранял ВШП и электрические элементы от контакта с жидкостью. Приемный преобразователь имел точно такую же конструкцию, что и излучатель. Излучатель и приемник располагались на специальной оправке, которая имела микрометрические элементы, которые позволяли прецизионно менять взаимное их расположение.

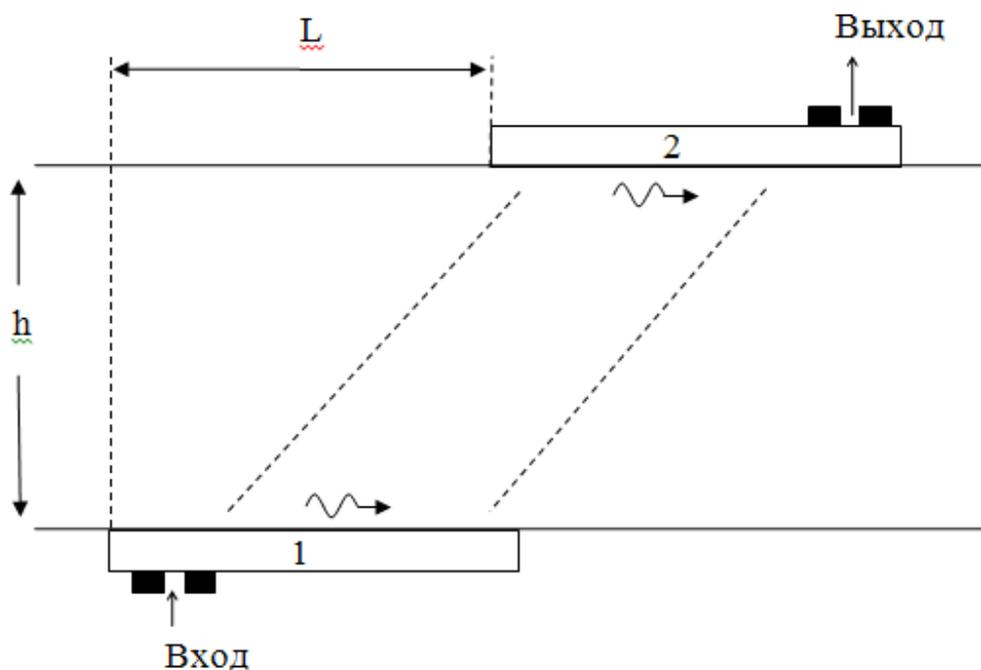


Рис. 3. Схема измерительного устройства.

Указанная конструкция помещалась в воду и подключалась к измерителю S-параметров типа E5071C. С помощью микрометрических элементов подбиралось такое взаимное расположение излучателя и приемника, при котором обеспечивалось минимальное затухание. На рис. 4 представлена частотная зависимость полных потерь, из которой видно, что минимальное затухание равно 12.38 дБ.

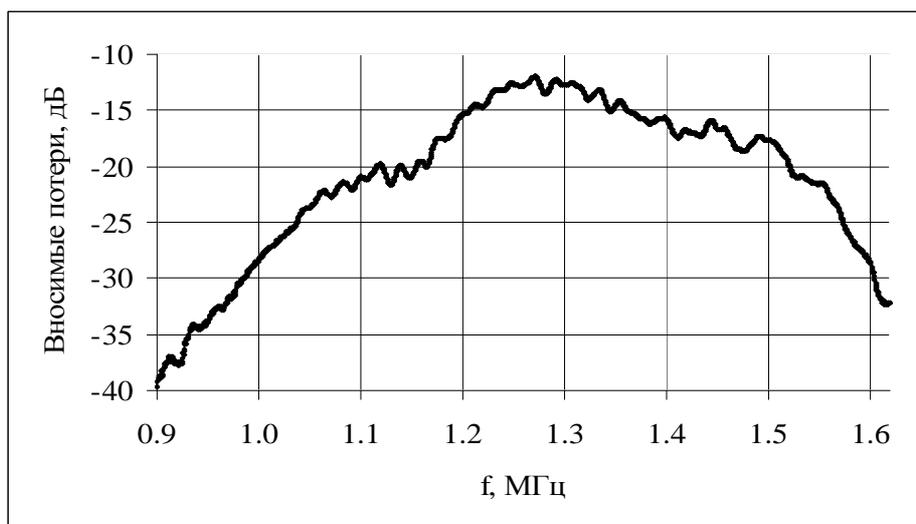


Рис. 4. Частотная зависимость полных потерь в системе «излучатель – жидкость – приемник» при отсутствии нанокomпозитных слоев на пластинах ниобата лития.

Затем на внешнюю сторону пластины ниобата лития одного из преобразователей с помощью клея RTV-162 была наклеена нанокomпозитная пленка толщиной 0.16 мм. Эта пленка представляла собой матрицу из полиэтилена высокого давления с наночастицами сульфида кадмия с концентрацией 30%. Были проведены вышеуказанные настройки и измерения. Полученная для этого случая частотная зависимость полных потерь представлена на рис. 5. Видно, что минимальное затухание оказалось равным 10.8 дБ, что на 1.6 дБ меньше, чем в эксперименте без нанокomпозитной пленки. Этот эксперимент качественно подтвердил теоретически ожидаемый вывод о том, что присутствие нанокomпозитного слоя должно привести к увеличению эффективности излучения/ приема акустической волны в жидкости. Теоретически ожидаемый выигрыш на длину волны ~ 1 дБ/ λ при длине излучателя 8λ дает ~ 8 дБ. Полученное расхождение связано с тем, что в теории не учтено влияние тонкого слоя клея, который присутствует в эксперименте, и влияние встречно-штыревого преобразователя.

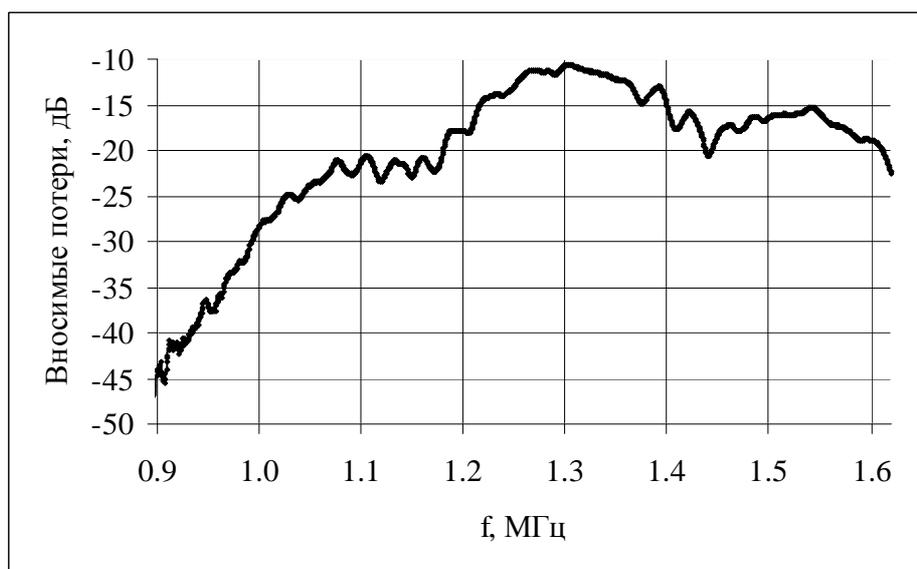


Рис. 5 Частотная зависимость полных потерь в системе «излучатель – жидкость – приемник» при наличии на одной пластине ниобата лития нанокompозитного полимерного слоя толщиной 160 мкм с наночастицами CdS с концентрацией 30%.

Проведенное теоретическое и экспериментальное исследование показывает перспективность применения нанокompозитных пленок на основе полиэтилена высокого давления для создания эффективных излучателей/приемников акустической волны в жидкость [20]. Эти преобразователи могут использоваться для создания расходомеров жидкости, а также применяться в качестве основных элементов подводных систем связи.

5. Выводы

В работе теоретически и экспериментально исследованы характеристики A_0 акустических волн, распространяющихся структуре «пьезоэлектрическая пластина – нанокompозитный полимерный слой – жидкость». Теоретически показано, что в случае использования в качестве промежуточного слоя нанокompозитного полимерного материала на основе матрицы полиэтилена высокого давления с наночастицами сульфида кадмия 30% концентрации возможно достичь улучшения эффективности излучения на ~ 1.6 дБ/л по мощности при соотношении толщин слоя и пластины $d/h=0.154$ при $f=1.3$ МГц. Выводы теории подтверждены

экспериментально. Полученные результаты могут быть использованы для разработки эффективных излучателей/приемников акустической волны в жидкость.

Работа поддержана Минобрнауки РФ ГК 14.740.11.0645, ГК 07.514.11.4080, РФФИ №10-02-01313а.

Литература

1. D.S. Ballantine, R.M. White, S.J. Martin, A.J. Ricco, E.T. Zellers, G.C. Frye, H. Wohltjen Acoustic Wave Sensors . San Diego: Academic Press, 1997. – 436P.
2. M.G. Schweyer, J.C. Andle, D.J. McAlister, L.A. French, J.F. Vetelino. An acoustic plate mode sensor for aqueous mercury // Proc. of IEEE Int. Ultras. Symp.- 1996.- P. 355-358.
3. I.V. Anisimkin, Yu.V. Gulyaev. Acoustic wave liquid sensing: features, tendencies, perspectives // Proc.17th International Congress on Acoustics.- 2001.- V.IV.-P.90-91.
4. B.D. Zaitsev, S.G. Joshi, I.E. Kuznetsova, I.A. Borodina. Acoustic waves in piezoelectric plates bordered with viscous and conductive liquids // Ultrasonics. - 2001.- V.39, N1.- P.45-50.
5. R.M. White, P.J. Wicher, S.W. Wenzel, E.T. Zellers. Plate-mode ultrasonic oscillator sensors / // IEEE Trans. on Ultrason., Ferroel. and Freq. Contr.- 1987.- V.34, N2.- P.162-171.
6. R.D. Watkins, W.H.B. Cooper, A.B. Gillespie, R.B. Pike. The attenuation of Lamb waves in the presence of a fluid // Ultrasonics.- 1982.- V.20.- P.257-264.
7. S.G. Joshi, B.D. Zaitsev, I.E. Kuznetsova. Miniature, high efficiency transducers for use in ultrasonic flow meter // Proc. of IEEE Int. Ultras. Symp.- 2004.- P.1286-1289.
8. J. Wu, Z. Zhu. Sensitivity of Lamb wave sensors in liquid sensing // IEEE Trans. on Ultrason., Ferroel. and Freq. Contr.- 1996.- V.43, N1.- P.71-72.

9. L. Scandelari, N. Noury, P. Benech, E. Chamberod. sensor for liquids characterization based on elastic surface waves generated with a P(VF₂-VF₃) film in a non-piezoelectric media // Ultrasonics.- 1998.- V.36.- P.15-20.
10. И.А.Бородина, С.Г. Джоши, Б.Д. Зайцев, И.Е. Кузнецова. Акустические волны в тонких пластинах ниобата лития // Акуст.журн.- 2000.- Т.46, N1.- С.42-46.
11. И.Е. Кузнецова, Б.Д. Зайцев, С.Г. Джоши, А.А. Теплых Влияние жидкости на характеристики антисимметричных волн Лэмба в тонких пьезоэлектрических пластинах // Акуст. журн. – 2007. – Т.53. – №5 – С.637-644.
12. I.E. Kuznetsova, B.D. Zaitsev, A.M. Shikhabudinov. Elastic and viscous properties of nanocomposite films based on low-density polyethylene// Trans. on Ultrason., Ferroel. And Freq. Control.- 2010.- V.57, N9.- P.2009-2011.
13. А. Олинер. Поверхностные акустические волны / Под. ред. А. Олинера.- М.: Мир, 1981. - Гл. 2. 390С.
14. Л.М. Бреховских, О.А. Годин. Акустика слоистых сред. М.: Наука, 1989.- 412С.
15. J.J. Campbell, W.R. Jones. 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, N2.- P.71-76.
16. G. Kovacs, M. Anhorn, H.E. Engan, G. Visintini, C.C.W. Ruppel. Improved material constants for LiNbO₃ and LiTaO₃ / // 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.- 1232С.
18. Э. Дьелесан, Д. Руайе. Упругие волны в твердых телах. М.: Наука, 1982.- 424 С.
19. S.G. Joshi, B.D. Zaitsev, I.E. Kuznetsova. Efficient mode conversion transducers for use in ultrasonics flow meters // Proceedings of IEEE Ultrasonics Symp.- 2009.- P.1491 – 1494.

20. И.Е. Кузнецова, Б.Д. Зайцев, И.А. Бородина, В.В. Колесов, А.В. Скнар, Н.Г. Петрова, А.В. Носов. Диаграмма направленности гидроакустического излучателя на основе A_0 волн Лэмба в пьезокерамической пластине // Радиотехника и электроника. -2011.- N11.-С.1403-1409.