

А. Р. БАЕВ, д-р техн. наук, проф.

А. Л. МАЙОРОВ, канд. тех. наук

М. В. АСАДЧАЯ, канд. тех. наук

А. Ю. БУРНОС

Г. И. РАЗМЫСЛОВИЧ

Институт прикладной физики НАН Беларуси (Минск, Беларусь)

ВЛИЯНИЕ ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЙ И СВОЙСТВ СВЕТОПОГЛОЩАЮЩИХ СРЕД НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИМПУЛЬСНО- ЛАЗЕРНОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ УПРУГИХ ВОЛН

Аннотация

Изучены особенности генерации упругих волн (УВ) импульсно-лазерным излучением в светопоглощающих (СП) средах - магнитных жидкостях (МЖ) и твердотельных пластинах. Получены зависимости амплитуды генерируемых УВ в: магнитных жидкостях от концентрации частиц коллоида, энергии лазерных импульсов, материала световода, реализуя разные режимы оптоакустического преобразования. Во второй части работы изучены особенности влияния акустического импеданса световода и звукопровода, толщины СП пластин и размера области (апертуры) генерируемых упругих волн на их амплитуду. Дана качественная трактовка полученным зависимостям, позволяющая определять условия эффективного оптоакустического преобразования в указанных и подобных средах.

Ключевые слова: импульсно-лазерное возбуждение ультразвуковых волн, светопоглощающие среды, структуроскопия.

Одно из направлений развития оптоакустических (ОА) методов и средств измерений связано с изучением особенностей взаимодействия импульсно-лазерного излучения (ИЛИ) со светопоглощающими (СП) средами как непосредственно для диагностирования их свойств, так и использовании в качестве генерирующих упругие волны (УВ) элементов устройств. Среди комплекса исследований, выполненных в указанном направлении, следует выделить работы сотрудников МГУ им М. Ломоносова, отмечая их значимый вклад в изучение механизма ОА преобразования и разработку методик диагностирования структуры микронеоднородных сред, например [1]. Объектом настоящих исследований служат магнитные жидкости (МЖ), относящиеся к классу управляемых внешними полями сред, а также СП полимерные пластины. Отметим, что первая работа по импульсно-лазерному возбуждению ультразвука в МЖ выполнена в «режиме эхо» [2], где в качестве материала световода, контактирующего с жидкостью, использовано кварцевое стекло. Были получены зависимости передаточной функции ОА преобразования от концентрации частиц магнетика $F(q)$, а также некоторые

данные о коэффициенте поглощения ИЛИ α . В работе [3] изучается структура поверхностного слоя разбавленных образцов МЖ на основе воды и керосина. Настоящие же исследования посвящены изучению эффективности ОА преобразования в образцах МЖ и СП пластинах при передаче в них ИЛИ через световоды с различными свойствами.

Методические особенности экспериментального исследования приведены на рис. 1а и рис. 1б и поясняются на работе представленных схем измерительных ячеек, в которых реализован теневой вариант прохождения зондирующего сигнала. При этом поток ИЛИ проходит через световод, и в результате ОА преобразования на границе контакта с СП средой, генерирует упругие колебания, которые принимаются пьезопреобразователем на рабочей частоте $f = 5$ МГц (рис. 1а), либо пьезопленкой (рис. 1б). В первом случае в качестве источника ИЛИ служил генератор типа Lotis с рабочей частотой импульсов 20 Гц длительностью $\tau = 16 - 18$ нс и энергией импульса W , варьируемой от нуля до 8 мДж.

После усиления сигнал поступает на осциллограф BORDO-2020 и блок обработки сигнала. Для измерения энергии импульсов использован прибор ПЭ-25SH, а данные о параметрах УВ заносятся с помощью программы Imergion в электронный блок обработки и анализа. Диаметр пятна лазерного луча, падающего нормально на границу световод - МЖ постоянный и равен $D = 5$ мм. Диапазон варьирования концентрации коллоида в МЖ, % $q = 0,15 - 8,2$.

Во втором же случае (рис. 1б) в качестве ОА преобразующего элемента используются СП пластины разной толщины, нагруженные с обеих сторон материалом звукопровода и световода, обладающие разным акустическим импедансом.

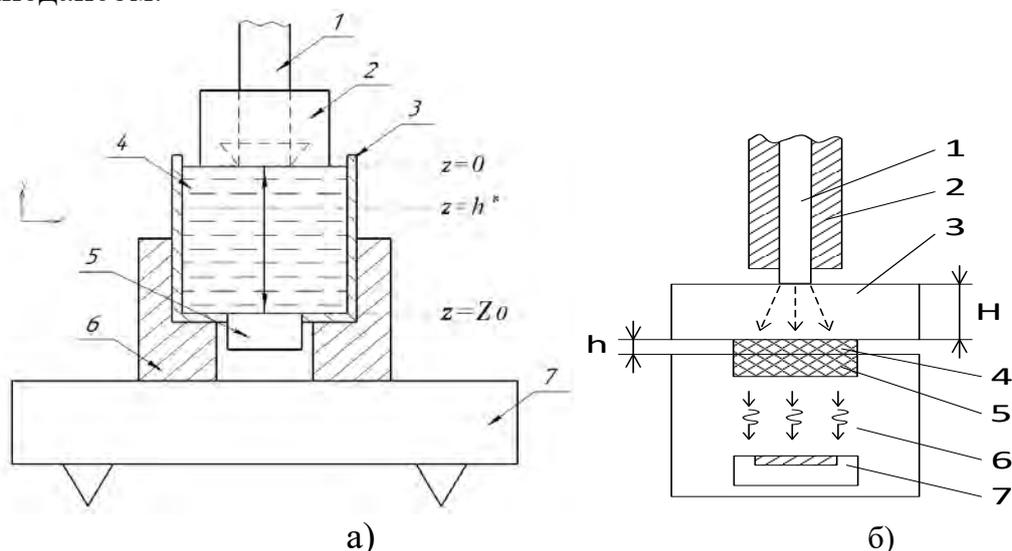


Рис. 1. Схемы генерации УВ под воздействием лазерного излучения в МЖ (а) и светопоглощающих пластинах (б): а) 1 – лазерный луч, 2 – световод, 3 и 4 – емкость с МЖ, 5 – пьезоприемник, 6 – фиксатор, 7 – опора; б) 1 и 2 – оптоволоконный кабель, 3 – световод, 4 – СП пластина, 5 – звукопровод, 6 – иммерсионная среда, 7 – пьезопленочный приемник

Энергия лазерного импульса $W = 50$ мкДж, излучаемая генератором с частотой 1 кГц, подводится к СП пластине с помощью оптоволоконного кабеля, имеющего на его торце выходное для света отверстие (апертуру) диаметром 0,66 мм. Последний располагается над световодом. В этом случае изучается влияние на параметры генерируемых УВ импульсов, толщины пластин и контактирующих с ними сред, размер области генерируемых УВ при изменении положения оптоволоконного кабеля.

Результаты экспериментальных исследований ОА преобразования в МЖ и СП пластинах приведены на рис. 2 - 4. Рис.2 иллюстрирует характер изменения амплитудных зависимостей $A_i(q)$ генерируемых упругих волн в результате оптоакустического преобразования в тонком слое МЖ, контактирующем с воздухом ($i = 1$) и кварцевым стеклом ($i = 2$) при варьировании содержания взвешенных частиц коллоида. А также приведены расчетные (оценочные) зависимости, касающиеся важных соотношений, связывающих длину световой волны λ с расстоянием между частицами коллоида и размером d^* .

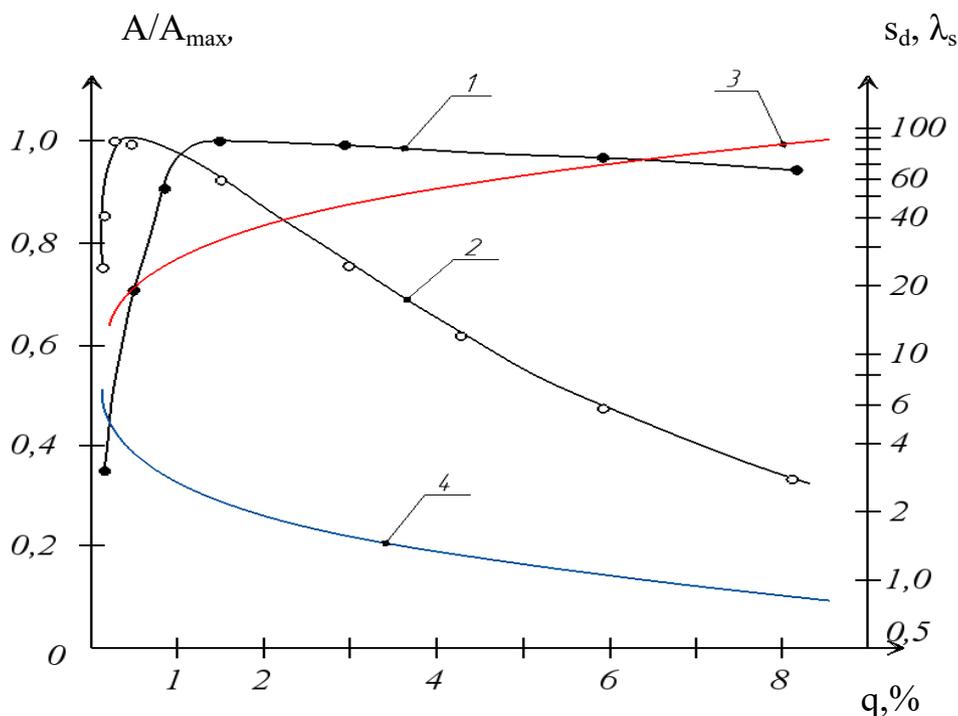


Рис. 2. Амплитуда генерируемых продольных волн, возбуждаемых импульсно-лазерным излучением на границе кварцевое стекло-МЖ (1) и воздух-МЖ (2), а также расчетные зависимости $\lambda_s = \lambda/s_{\Pi}$ и $s_d = s_{\Pi} /d^*$, связывающие расстояние между поверхностью частиц с длиной световой волны λ (3) и размером частиц коллоида d^* (4).

При выполнении первого этапа работы, направленного на исследование ОА преобразования в магнитных жидкостях, установлено, что изменение энергии импульса лазерного излучения в диапазоне $W = 0 - 7$ мДж сопровождается квазилинейным ростом амплитуды возбуждаемых колебаний, т.е.

$$A_i(q) = \Theta W,$$

где коэффициент Θ определяется преимущественно концентрацией коллоида и отношением удельных акустических сопротивлений МЖ и световода $\varepsilon_i = R_{\text{МЖ}} / R_C = \rho_{\text{МЖ}} C_{\text{МЖ}} (\rho_C C_C)^{-1}$, для $i = 1$ и $i = 2$ соответствуют условия контакта МЖ с воздухом - свободная граница (СГ), и с кварцевым стеклом – жесткая граница (ЖГ). Причем в последнем случае максимальное значение Θ достигается при $q > 0,5$ %, когда фазовый сдвиг генерируемых на границе $z = 0$ колебаний $\varphi_0 = 0$, а коэффициент отражения $\mathfrak{R} = (1 - \varepsilon_R)(1 + \varepsilon_R)^{-1} \rightarrow 0,8-0,85$.

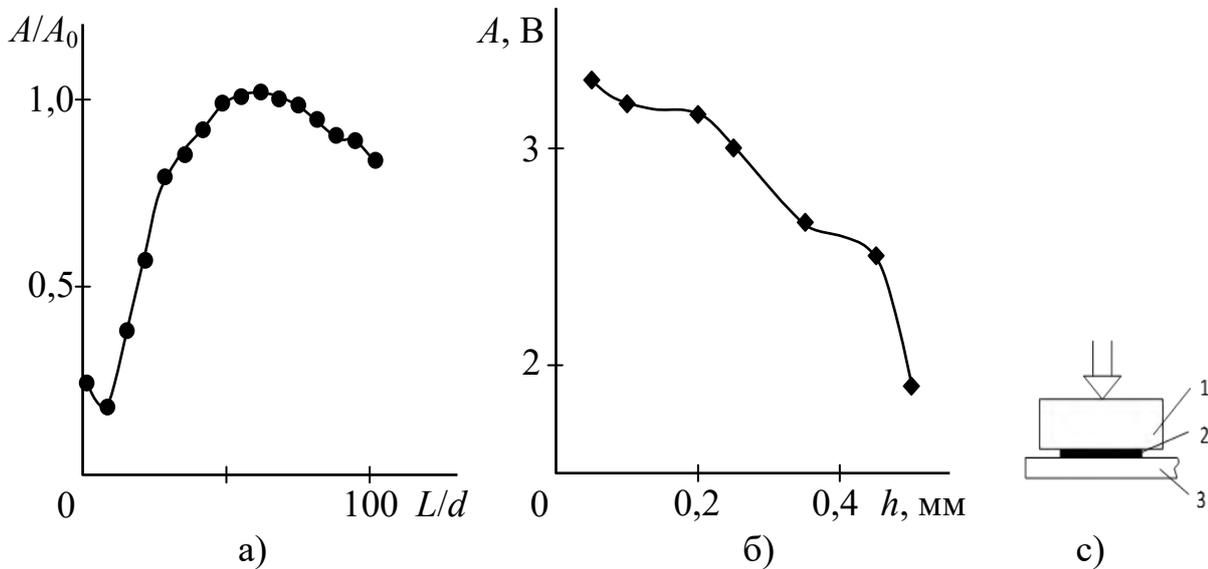


Рис. 3. Влияние высоты расположения источника лазерного излучения (оптоволоконного кабеля) над СП пластиной (а), а также ее толщины (б) на амплитуду возбуждаемых УВ с поясняющей схемой ОА-преобразования (с): с) 1 - кварцевое стекло; 2 - СП слой; 3 - оргстекло.

Если же реализуется свободная граница контакта указанных сред, то $\mathfrak{R} \rightarrow 1$, а $\varphi_0 \rightarrow -\pi$, т.е., в этом случае в окрестности границы $z = 0$ следует ожидать фазового сдвига упругих колебаний части подвергнутого лазерному воздействию слоя по отношению к другой его части, находящейся в окрестности $z \rightarrow h$, характеризующей глубину проникновения света.

Установлено, что зависимости $A_i(q)$ имеют максимумы A_{1m} и A_{2m} при характерных значениях концентраций коллоида q_{m1} и q_{m2} , для которых отношение $A_{2m}/A_{1m1} \approx 1,3-1,4$. Значения же q_{m1} и q_{m2} , полученные при аппроксимации опытных данных, находятся в диапазоне $q = 0,3 - 0,4$ и $1,8 - 2,5$ % соответственно. Важно отметить, что согласно [2], при $q < 1$ % реализуется «жортоволновой режим» лазерного возбуждения УВ, при котором длительность ИЛИ $\tau \ll (C\alpha)^{-1}$, а если $q > 2-3$ %, то $\tau \gg (C\alpha)^{-1}$ и реализуется «длинноволновой режим» генерации УВ, при котором спектр генерируемых колебаний определяется спектром лазерного импульса. Кроме того, и ход зависимостей $A_i(q)$ имеет значительное отличие. Так, если $q > q_{2m}$, а световод кварцевое стекло, то с ростом q в диапазоне $q_{2m} \leq q \leq 8,2$ % наблюдается монотонное уменьшение $A_2(q)$, не превышая 10 %.

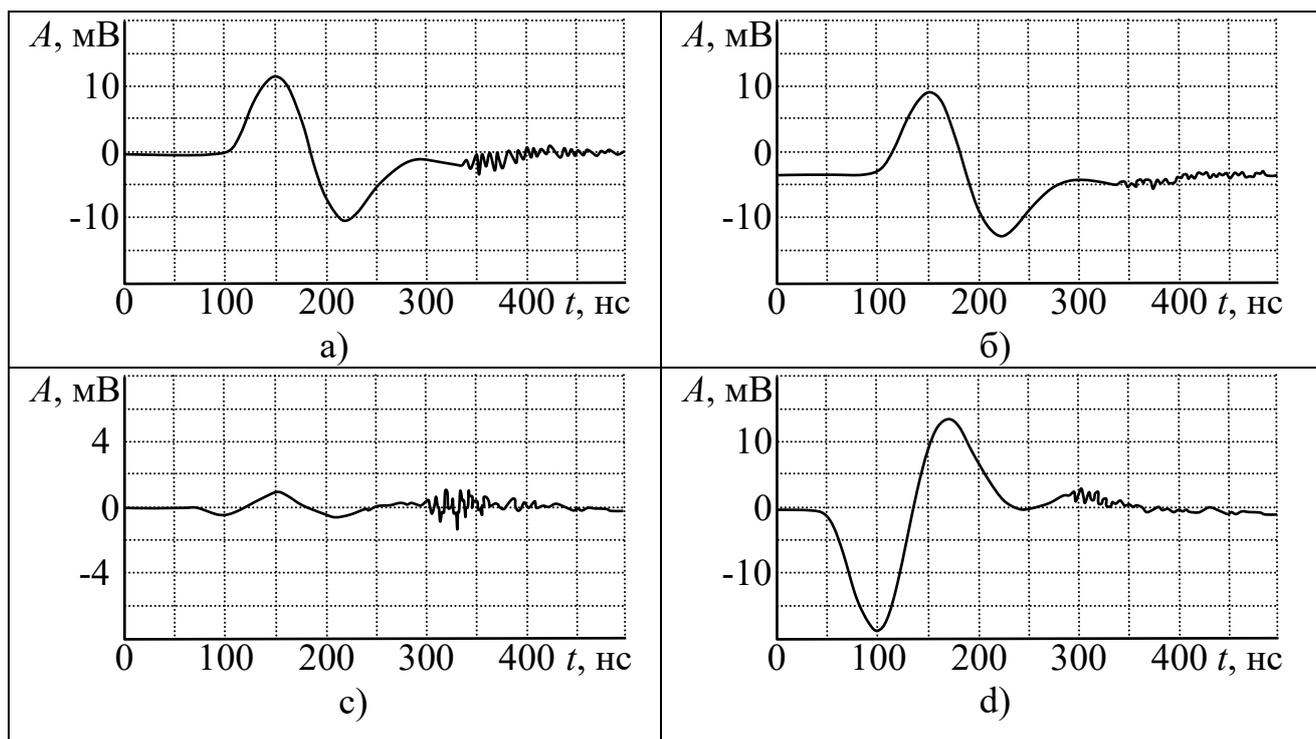


Рис. 4. Влияние материала световода, контактирующего с СП пластиной, на двойную амплитуду A генерируемых лазерным излучением УВ: а) материал световода вода – $A=22$ мВ; б) глицерин - 21 мВ; (с) воздух – 2,3 мВ; д) кварцевое стекло - 36,2 мВ.

Если же световод - воздух, то величина акустического сигнала $A_1(q)$ с ростом q в диапазоне $q_{1m} \leq q \leq 8,2\%$ уменьшается практически в четыре раза. На основе подробного анализа механизма лазерной генерации УВ и их прохождения в слое МЖ от границы контакта МЖ-световод ($z = 0$) до приемного преобразователя ($z = H$) дана в одномерном приближении качественная трактовка особенностям формирования акустического поля в МЖ и их приема. При этом учтем, что $(H, D) \gg h$, где D - диаметр лазерного пятна на границе МЖ - световод, а h - толщина слоя коллоида (называемого как МЖ₁), в котором в результате поглощения света происходит генерация УВ. Согласно общим представлениям [1], его величина может быть оценена как $h \approx k\alpha^{-1}$, где k - коэффициент, характеризующий особенности механизма ОА преобразования, а α^{-1} - оцененное расстояние прохождения ИЛИ по коллоиду, соответствующее уменьшению интенсивности потока ИЛИ на 10 дБ. (Детальный анализ рассматриваемой проблемы предполагается дать в отдельной публикации).

Необходимо отметить, что рост q в МЖ сопровождается увеличением не только энергии W импульса, но и плотности ее w в области поглощения, поскольку $w \sim W \alpha$. При этом распределение источников термических сил в слое МЖ₁, генерирующих УВ, полученное с учетом закона Бугера [1], имеет вид:

$$G(z,t) \sim \partial J / \partial z = -J_0 \alpha Y D_1 D_2 C F^*(t) \exp(-\alpha z),$$

где J_0 – интенсивность потока ИЛИ, а D_1 и D_2 – коэффициенты прохождения ИЛИ через границы световода, $Y = C \beta_T (c_p)^{-1}$; C , β_T и c_p – скорость УВ, термическая сжимаемость и теплоемкость МЖ соответственно. Согласно предлагаемой модели, считаем, что возникающие в результате ОА преобразования в МЖ₁ термические силы формируют в МЖ₂ поле в виде суперпозиции полей 2-х источников УВ, локализованных в окрестности $z \rightarrow 0$ (A_0^*) и $z \rightarrow h$ (A_h^*):

$$A_\Sigma(z) = A_0^*(z) + A_h^*(z).$$

Причем результирующее поле $A_\Sigma(z)$ будет определяться граничными условиями и расстоянием h между модельными (условными) источниками УВ. При этом фазовый сдвиг между ними:

$$\varphi_{21} = \varphi_2 + \varphi_0 - \varphi_1 = -\delta_1 \pi - 2\pi h f_p / C,$$

где $\delta_1 = 1$ соответствует контакту МЖ с воздухом, а $\delta_2 = 0$ – с кварцевым стеклом. В таком случае, учитывая особенности возбуждения УВ лазерным излучением, следует ожидать появление максимумов амплитуды поля при $\varphi_{21} \rightarrow -2\pi n$, где, если учесть особенности ОА тракта, наиболее вероятна ситуация, когда $n = 0$ или 1. Так, если реализуется первый вариант измерений, а $n = 1$, то $h \rightarrow 0,5C/f_p = 0,5\lambda_p$, откуда следует, что $\alpha = 2\kappa/\lambda_p$. Если учесть, что $\lambda_p \approx C/f_p$ 0,28, $\kappa = 1 - 1,5$, то используя дополнительно данные работы исследований, проведенных в Институте Физики НАН Беларуси, оцененная величина концентрации коллоида q_{1m} находится в диапазоне 0,32 – 0,48 %, который близок к полученному нами и приведенному выше. Отметим, что если $2\pi h f_p / C \rightarrow 0$, то несмотря на рост термических сил в МЖ₁ при $q > q_{1m}$, наблюдается существенное уменьшение величины $A_1(q)$, вызванное преимущественно работой в противофазе указанных двух источников УВ, локализованных в окрестности $z = 0$ и h . Если же граница МЖ-световод жесткая, то при $q \geq q_{2m}$ $\varphi_{21} \rightarrow 0$ и реализуется длинноволновой режим ОА преобразования, при котором спектр возбуждаемых МЖ слоев колебаний определяется спектром ИЛИ. Небольшое уменьшение $A_2(q)$ при $8,2 \geq q > q_{1m}$ (< 10 %) обусловлено преимущественно ростом затухания УВ, прохождением части их энергии в световод, а также возможным изменением теплофизических свойств МЖ.

На основе изучения возбуждаемых лазерным импульсом УЗ колебаний в СП пластинах установлены зависимости параметров возбуждаемых импульсов от толщины СП и высоты L расположения источника света над объектом, контакта СП пластины со световодом и звукопроводом. При оптимизации параметров ОА тракта установлено (рис. 5), что функция прохождения зондирующего сигнала, зависящая от $L_d = L / d$, возрастает в диапазоне $0 < L_d < L_{d,max}$, где $L_{d,max}$, находится в окрестности $L_d = 50 - 60$, когда световодом служит воздух. Обнаруженный характер хода зависимости $A(L_d)$ объясняется, прежде всего тем, что рост L_d сопровождается увеличением диаметра светового

пятна на внешней поверхности СП пластины $D_{И0} = 2L \operatorname{tg}\theta_{И0}$ и, естественно, площади $S_{И}$, которая практически совпадает с областью (или апертурой) источника возбуждаемых УВ площадью $S_A \rightarrow S_{И} = 0,25\pi (D_{И0})^2$, где $\theta_{И0}$ – максимальный угол отклонения световых лучей от главной оси измерительной ячейки. При этом, увеличение амплитуды фиксируемого сигнала с высотой L происходит, прежде всего, за счет повышения направленности излучаемых УВ и уменьшения угла раскрытия основного лепестка диаграммы направленности его источника. При достижении максимума амплитуды УВ площадь пятна ИЛИ сопоставима с площадью приемника-пьезопленки $S_{П} = 25 \text{ мм}^2$, а рост амплитуды УВ составляет 4,5 - 5 раза. Если же $L > L_{d,\max}$, то из-за превышения размера апертуры области генерации УВ часть потока последних «гибает» контур их приемника.

Отметим, что дальнейшее повышение эффективности работы преобразователя может быть достигнуто путем корректного выбора материала световода, например (как упоминалось выше) стекла или кварца. Приведенные на рис.5 в качестве примера осцилляции генерируемых УВ путем передачи энергии ИЛИ на СП пластину через световоды с разными акустическими и оптическими свойствами, свидетельствуют о том, что о наибольшая эффективность ОА преобразования достигается именно в случае применения в качестве световода кварцевого стекла или подобного материала, коэффициент преломления которых $n = 1,5 - 1,6$. Использование же для этих целей воздуха является неэффективным, что согласуется с предложенной выше теоретической трактовкой, поясняющей особенности ОА возбуждения упругих волн в магнитных жидкостях для аналогичных граничных условий.

Результаты исследований представляют интерес для совершенствования комбинированных средств контроля и диагностики структуры материалов, а также моделирования процессов ОА преобразования в дисперсных сис*темах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гусев, В.Э., Карабутов А.А. Лазерная оптоакустика. Москва: Наука, 1991. – 304 с.
2. Баев А.Р., Прохоренко П. П. , Карабутов А. А., Подымова Н. Б. Особенности возбуждения упругих волн в магнитных жидкостях лазерным излучением //Магнитная гидродинамика, 1996, №3, с. 23 - 30.
3. Соколовская Ю.Г., Подымова Н.Б., Карабутов А.А. Исследование структурой неоднородности магнитной жидкости посредством восстановления пространственного распределения коэффициента экстинкции света с использованием лазерного оптико-акустического метода // Акустический журнал, 2020, том. 66, №3, с.284 – 293.

Контакты:

baev@iaph.bas-net.by (Баев Алексей Романович)
mayorov@iaph.bas-net.by (Майоров Александр Леонидович)
asadchaya@iaph.bas-net.by (Асадчая Мария Вадимовна)
burnas@iaph.bas-net.by (Бурнос Артем Юрьевич)
razmyslovich@iaph.bas-net.by (Размыслович Геннадий Иванович)