

УДК 534.2/.4

**ИМПУЛЬСНО-ЛАЗЕРНОЕ ВОЗБУЖДЕНИЕ УПРУГИХ ВОЛН  
В СВЕТОПОГЛОЩАЮЩЕЙ СРЕДЕ***А. Р. БАЕВ, А. Л. МАЙОРОВ, А. Ю. БУРНОС, Г. И. РАЗМЫСЛОВИЧ,  
М. В. АСАДЧАЯ*Институт прикладной физики НАН Беларуси  
Минск, Беларусь

UDC 534.2/.4

**PULSE-LASER EXCITATION OF ELASTIC WAVES IN  
A LIGHT-ABSORBING MEDIUM***A. R. BAEV, A. L. MAYOROV, A. Y. BURNOS, G. I. RAZMYSLOVITCH,  
M. V. ASADCHAYA*

**Аннотация.** Экспериментально изучены особенности импульсно-лазерного возбуждения ультразвуковых волн с использованием двух видов светопоглощающих сред (СПС), выполненных на полимерной (твердой) основе и на масляной основе (наномагнитные жидкости). Выявлены характерные зависимости изменения амплитуды и формы возбуждаемых импульсов от толщины слоя СПС на полимерной основе  $h = 0,1 \dots 0,5$  мм и высоты  $L$  расположения источника лазерного излучения относительно поверхности СПС для контактирующих с СПС материалами световода и звукопровода (стекло, оргстекло, воздух). Установлены особенности изменения коэффициента оптоакустического (ОА) преобразования в наномагнитной жидкости при изменении коэффициента поглощения излучения за счет варьирования концентрации дисперсной фазы магнетика в диапазоне до 8 %. Результаты исследований представляют интерес для разработки комбинированных ОА устройств применительно к контролю объектов со слоистой и неоднородной структурой.

**Ключевые слова:** импульсно-лазерное возбуждение ультразвуковых волн, светопоглощающие слои.

**Abstract.** The peculiarities of pulse-laser excitation of ultrasonic waves using two types of light-absorbing media (LAS) made on a polymeric (solid) basis and on an oil basis (nano-magnetic liquids) have been studied experimentally. For the first time the characteristic dependences of changes in the amplitude and form of excited pulses on the layer thickness of LAS on a polymeric basis  $h = 0,1 \dots 0,5$  mm and the height  $L$  of the laser radiation source, relative to the LAS surface for the materials contacting with it of the light and sound conductor (glass, plexiglass, air) were revealed. The peculiarities of changes in the OA conversion coefficient in the nano-magnetic liquid were also found when the radiation absorption coefficient varies due to varying the concentration of the dispersed phase of the magnetite in the range of up to 8 %. The research results are of interest for the development of combined OA devices as applied to the control of objects with a layered and heterogeneous structure.

**Keywords:** pulsed-laser excitation of ultrasonic waves, light-absorbing layers.

Одно из перспективных направлений неразрушающего контроля изделий и материалов состоит в применении для этих целей возбуждаемых импульсно-лазерным излучением ультразвуковых волн (УЗВ) [1], что реализуется несколькими методами. Один из них состоит в том, что в качестве преобразователя импульсного лазерного излучения (ЛИ) в ультразвуковые колебания служат

светопоглощающие слои (СПС). В результате нестационарного нагрева в их объеме возникают термонапряжения  $\sigma(t)$  и генерируются акустические импульсы  $A(t)$ , вводимые в исследуемые объекты для выявления несплошностей и структуроскопии материалов по данным амплитудных, спектральных характеристик, а также дисперсии скорости звука различных мод. Несмотря на то, что для реализации методики измерений необходимо создание акустического контакта, возбуждение УЗВ происходит при сравнительно малой энергии лазерных импульсов ( $\sim 50 \dots 100$  мкДж), а также их длительности  $\Delta t \sim 10$  нс и менее. При работе в сочетании с широкополосными преобразователями (ПЭП) представляется возможным не только расширить возможности контроля структуры гетерогенных и слоистых сред по данным спектральных характеристик зондирующего сигнала, но обеспечить высокую точность измерения скорости поверхностных и подповерхностных волн (до нескольких наносекунд). Необходимо отметить значительный вклад в эту область исследований, внесенный группой под руководством д-ра физ.-мат. наук, проф. А. А. Карабутова (Международный лазерный центр, г. Москва) [2]. Проведенные ранее совместно с ним на базе Международного лазерного центра (г. Москва) исследования позволили достаточно детально выявить механизм генерации УЗВ в наноманитных жидкостях (НМЖ) на основе керосина и минерального масла в предельном диапазоне варьирования концентрации  $Q = 0 \dots 27$  % [3]. Эти данные получены в режиме эхо, т. е. при одностороннем вводе-приеме лазерного и акустического импульса. В реальной ситуации требуется организация теневого режима прозвучивания объекта, поясняемая согласно схеме, приведенной на рис. 1: ЛИ  $\rightarrow$  световод  $\rightarrow$  СПС  $\rightarrow$  объект контроля  $\rightarrow$  приемный ПЭП. Причем во многих случаях в качестве СПС используются твердые тела, как, например, в [4]. Оптимизация же оптоакустического (ОА) тракта и конструкций реализующих метод преобразователей требует проведения соответствующих исследований.

Цель настоящей работы заключается в экспериментальном моделировании поясняемой на рис. 1 схемы функционирования ОА-преобразователей, включая влияние контактирующих с СПС сред, имеющих удельные акустические сопротивления  $\mathcal{R}_{c,z} = \rho_{c,z} c_{c,z}$ , толщины СПС  $h$ , где индекс  $c$  соответствует материалу световода, а  $z$  – звукопровода.

**Методика исследований и моделирования.** Объектом исследования или преобразующего импульсно-лазерное излучение в продольные волны материала являются микронеоднородные среды из светопоглощающего полимера толщиной  $h = 0,05 \dots 0,5$  мм и образцы НМЖ с минеральной основой и концентрацией дисперсной фазы  $Q = 0,23 \dots 8$  %. Лазерное излучение имеет длину волны  $\lambda = 1,06$  мкм. При моделировании в качестве варьируемых материалов световода и звукопровода использованы кварцевое стекло, оргстекло и воздух.

Представленная на рис. 1 схема измерений работает следующим образом. ЛИ, распространяясь через оптоволоконный кабель и световод, генерирует в СПС продольные волны, поток энергии которых направлен преимущественно вдоль акустической оси. Последние через звукопровод и иммерсионную

жидкость (воду) проходят через протектор на широкополосный приемник, а затем на электронный блок обработки информации.

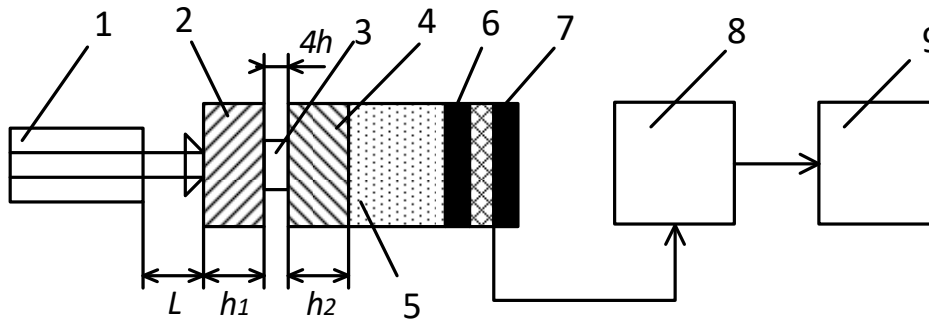


Рис. 1. Схема установки: 1 – оптоволоконный кабель; 2 – световод; 3 – СПС; 4 – звукопровод; 5 – иммерсионная среда; 6 – протектор; 7 – пьезоэлемент; 8 – осциллограф; 9 – компьютер

**Результаты исследований.** На основе изучения возбуждаемых лазерным импульсом УЗ-колебаний в СПС с полимерной основой установлены характерные зависимости изменения амплитуды и формы возбуждаемых импульсов от толщины СПС  $h = 0,1 \dots 0,5$  мм и высоты  $L$  расположения источника лазерного излучения, передающегося через световодный кабель, относительно наружной поверхности СПС при различном соотношении удельных акустических сопротивлений  $\mathcal{R}_{с,з}$  материалов световода и звукопровода по отношению к удельному акустическому сопротивлению светопоглощающего слоя  $\mathcal{R}_{СПС}$ .

Как видно, полученные осциллограммы импульсов, характерные для различных вариантов согласования акустических материалов СПС с звукопроводом и световодом, в ряде случаев могут отличаться как по амплитуде, так и по форме сигнала, а также длительности первой осцилляции. При этом изменение максимальной амплитуды импульса достигает 2–2,5 раза, а величины  $\Delta t$  до 25 %...30 %. Это играет важное значение при использовании рассматриваемого метода для измерения скорости той или иной моды или ее спектра в исследуемом объекте при диагностировании его структуры. Как показывает анализ процесса формирования акустического сигнала для условий, когда расстояние между источником излучения и СПС  $L = \text{const}$ , значительное влияние на указанные параметры импульса вносит различие коэффициентов прохождения УЗВ границы с водой  $D_{зж} = 2\mathcal{R}_z (\mathcal{R}_z + \mathcal{R}_{жс})^{-1}$ . Так, например, для случая, когда звукопровод – стекло или оргстекло, их величины  $D_{зж}$  отличаются в  $\approx 3,5$  раз. В то же время при  $D_{зж} \rightarrow 1$  и наличии контакта СПС – вода, где световоды играют одновременно роль акустической нагрузки, наблюдается значимое искажение формы импульса, что затрудняет использование такой схемы ОА-преобразования для ряда измерительных процедур (рис. 2).

Проведенные исследования (рис. 3) показали существенный рост (в 4,5–5 раз) амплитуды  $A/A_0$  сигнала в зависимости от высоты расположения источника ЛИ, которая при  $30 < L^* = L/d < 100$  имеет характерное плато, если в качестве световода служит воздух. Этот эффект обусловлен тем, что с ростом  $L$

возрастает площадь  $S = \pi r^2$  или апертура источника ЛИ, что и приводит к росту акустического сигнала. Дальнейшее повышение эффективности работы преобразователя с СПС может быть достигнуто при корректном выборе материала светопровода. Так, если это стекло или кварц, для которых коэффициенты преломления света  $n \approx 1,5...1,6$ , то следует ожидать изменения хода функции  $A(L)$ , что сопровождается «затягиванием» момента появления плато у этой кривой, имеющим место при больших значениях  $L$ , а также повышением направленности возбуждаемых УЗВ.

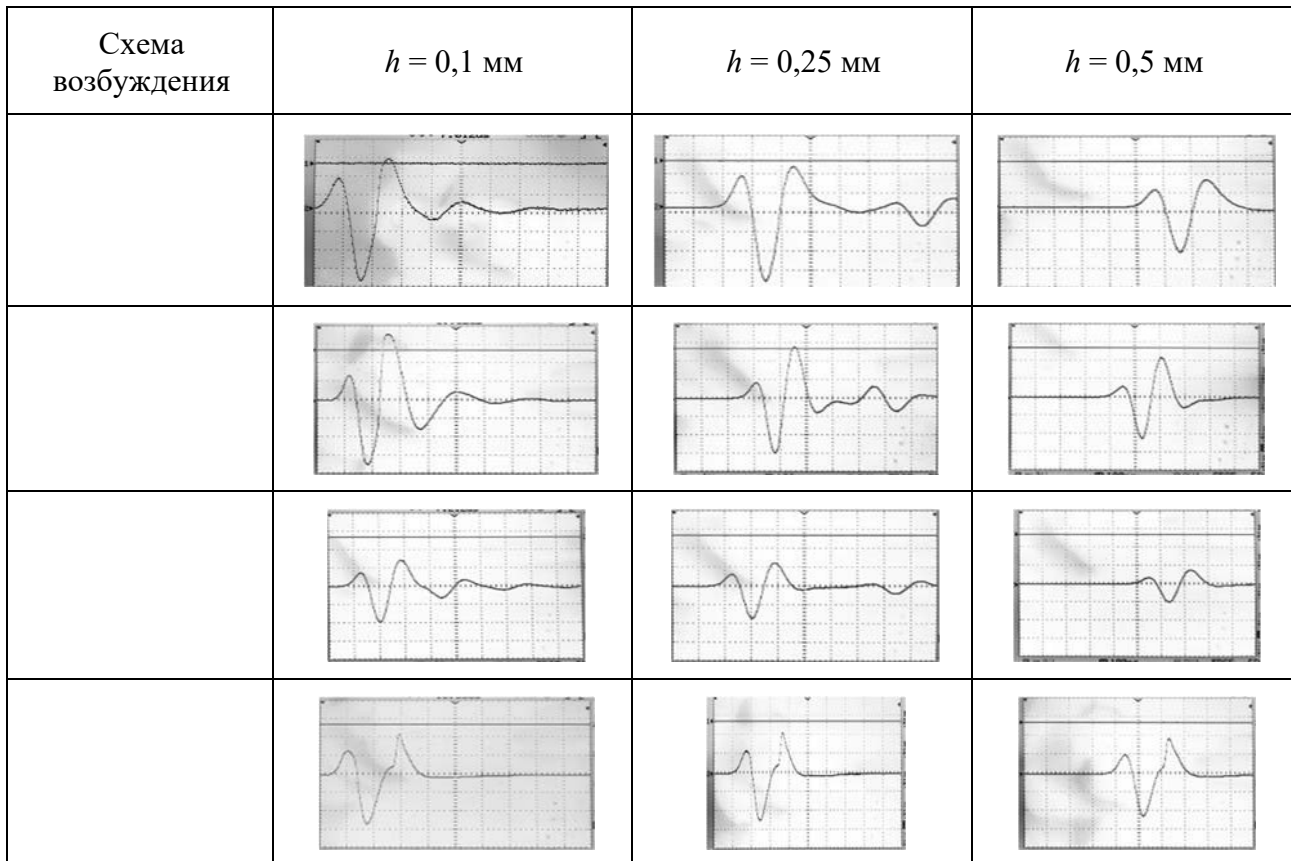


Рис. 2. Схемы импульсно-лазерного возбуждения УЗВ и их осциллограммы при различной толщине СПС и контактирующих с ним материалов

**Наномангнитная жидкость как СПС.** В данном случае поток энергии лазерного луча диаметром в поперечном сечении 3 мм через светопроводы падает на поверхность НМЖ, а возбуждаемые колебания фиксируются пьезоприемником на рабочей частоте  $f = 4$  МГц. Приведенные на рис. 4 зависимости сигнала УЗВ от концентрации магнитной фазы в НМЖ имеют существенное различие, связанное с граничными условиями в области контакта световода с НМЖ. В этом случае реализована свободная граница (воздух – НМЖ) и жесткая (стекло – НМЖ) по отношению к нормальной составляющей возбуждаемых на границе колебаний. Причем пространственное распределение источников колебаний определяется коэффициентом поглощения ЛИ  $\alpha_1$ . Именно параметр  $b = (\alpha_1)^{-1}$  определяет размер распределенных источников УЗВ, сказывающихся на формировании импульса. Как показывает анализ физических

процессов при ОА, обе зависимости  $A(Q)$  имеют максимум, амплитуда которого и положение на оси  $Q$ , а также ход кривых при  $Q > Q^*$  определяются комплексом теплофизических и акустических процессов. В особенности это связано с существенным отличием фазового сдвига (на  $\pi$ ) отраженных от указанной границы волн. Обращено внимание на необходимость прояснения различия и проявления механизма ОА-преобразования для двух рассматриваемых схем возбуждения УЗВ с помощью имеющих разную структуру СПС, что представляет интерес для разработки комбинированных схем ОА-диагностики материалов с неоднородной и слоистой структурой.

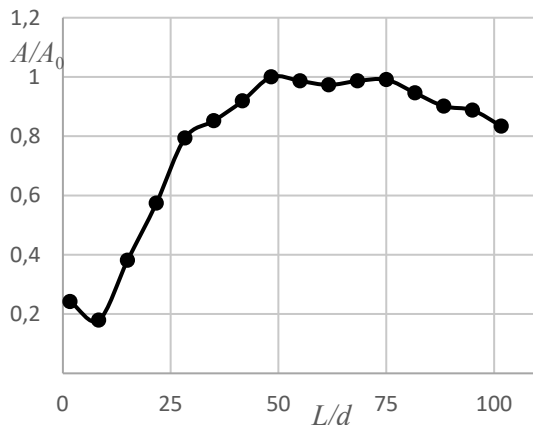


Рис. 3. Амплитуда УЗВ от высоты расположения  $L$  источника лазерного излучения диаметром над СПС, выполненным на полимерной основе

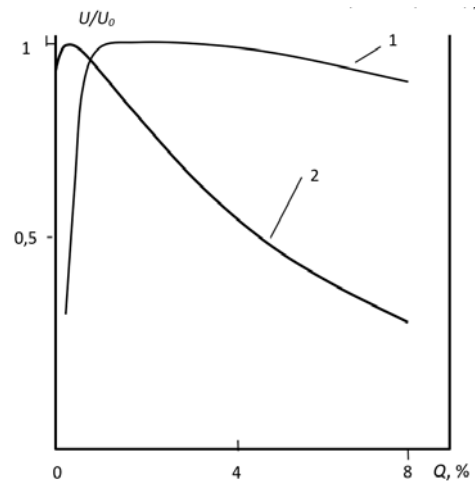


Рис. 4. Нормализованная зависимость сигнала УЗВ от концентрации магнитной фазы в НМЖ при прямом воздействии ЛИ на границу с НМЖ световода из стекла (1) и воздуха (2)

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Minchalin, J.-P.** Laser ultrasonics: from the laboratory to industry / J.-P. Minchalin // Rev. of Progress in Quantitative NDE. – 2003. – № 23A. – P. 3–31.
2. **Гусев, В. Э.** Лазерная оптоакустика / В. Э. Гусев, А. А. Карабутов. – Москва: Наука, 1991. – 304 с.
3. **Карабутов, А. А.** Лазерный оптико-акустический метод локального измерения упругих модулей композиционных материалов, упрочненных частицами / А. А. Карабутов, Л. И. Кобелева, Н. Б. Подымова // Техническая акустика. – 2010. – Вып. 15. – С. 13–21.
4. Особенности возбуждения упругих волн в магнитных жидкостях лазерным излучением / А. Р. Баев [и др.] // Магнитная гидродинамика. – 1996. – № 3. – С. 23–30.

E-mail: baev@iaph.bas-net.by, asadchaya@iaph.bas-net.by.