

## МАГНИТНАЯ ЖИДКОСТЬ КАК ОПТОАКУСТИЧЕСКАЯ СРЕДА

Баев А.Р., Митьковец А.И., Майоров А.Л., Коновалов Г.Е.

ГНУ «Институт прикладной физики НАН Беларуси»

г. Минск, Беларусь, E-mail: baev@japh.bas-net.by

Магнитные жидкости (МЖ) относятся к классу нано-материалов и представляют собой коллоидные растворы взвешенных в дисперсионной среде частиц магнетика. Они являются управляемыми с помощью магнитных полей средами, обладают высокой агрегативной и седиментационной устойчивостью и нашли широкое применение в различных технических приложениях [1]. Как показывают данные исследований [2], использование МЖ перспективно как в технике ультразвуковых измерений и контроля [3], так и в области ультразвуковых технологий, включая управляемые магнитожидкостные звукопроводы для создания акустического контакта, жидкие линзы и дефлекторы акустического луча, акустические уплотнители и др. [3]. С другой стороны, МЖ может быть применена для управления не только акустическими, но и световыми потоками под воздействием внешних полей [1]. Из анализа акустических, оптических, магнитных и других свойств МЖ следует, что она может быть использована как элемент оптоакустического (ОА) преобразователя, служащего в качестве источника импульсов ультразвуковых волн (УВ) малой длительности  $\tau \sim (1-5) \cdot 10^{-2}$  мкс, а также (что важно) и звукопровода, создающего акустический контакт между твердыми телами [2]. Одна из конструкций такого ОА-контактного преобразователя (рис. 1) позволяет осуществлять ввод УВ в объекты под различными углами  $\alpha$  в соответствии с законом Снеллиуса:  $\alpha = \arcsin(m \sin \beta)$ , где  $c$  – скорость падающих из МЖ на границу сред УВ под углом  $\beta$ ,  $m = c/c_{R,L,T}$ , а индексы  $R$ ,  $L$  и  $T$  соответствуют возбуждаемой в объекте рэлеевской, продольной и поперечной моде соответственно. При этом представляется возможным реализовать качание акустического луча в объекте и его вращение [2]. Используя результаты исследований в работе [4], можно получить данные о скорости звука в МЖ и определить связь  $\alpha(\beta)$ .

На рисунке 1 в качестве примера приведены концентрационные зависимости первого ( $\beta_1$ ) и второго ( $\beta_2$ ) критических углов падения волны на стальной образец, а также угла  $\beta = \beta_{\text{Пав}}$ , соответствующего возбуждению поверхностной волны. Как показывают расчеты, коэффициент звукопрозрачности по энергии  $D_W$  для ряда материалов (сталь, латунь, дюраль, кварц) при изменении концентрации магнетика от нуля до  $q \sim 25-27\%$  увеличивается практически в 2 раза.

Проведен анализ оптоакустического тракта в двумерной постановке в предположении, что на границу светопровода падает световой поток интенсивностью  $J$ . Фиксируемый при ОА-преобразовании акустический сигнал может быть представлен в виде:

$$A \sim J D_{Y_{\text{ОА}}} \Re(\delta, \xi) \int \tilde{F}(\omega) e^{-i\omega t} d\omega \int g(z') e^{-i\alpha z'/c} dz'$$

$$\frac{2R_1 R_2}{R_2 + R_1}$$

где  $D = \frac{2R_1 R_2}{R_2 + R_1}$ , а  $R_i$  – удельное акустическое сопротивление МЖ ( $i=1$ ) и светопровода

(2) соответственно,  $\Re(\delta, \xi)$  – функция, характеризующая диссипацию энергии вследствие затухания упругих волн;

$g(z') = \frac{c \beta_T}{c_p} I_0 F(t) \frac{d}{dz} \left[ \exp \left( - \int_0^z \alpha_1(\xi) dz \right) \right]$  – функция генерируемых (светом) тепловых

источников волн в объеме коллоида,  $Y_{\text{ОА}} = \beta_T (c_p)^{-1}$ ,  $\beta_T$  – термическая сжимаемость.

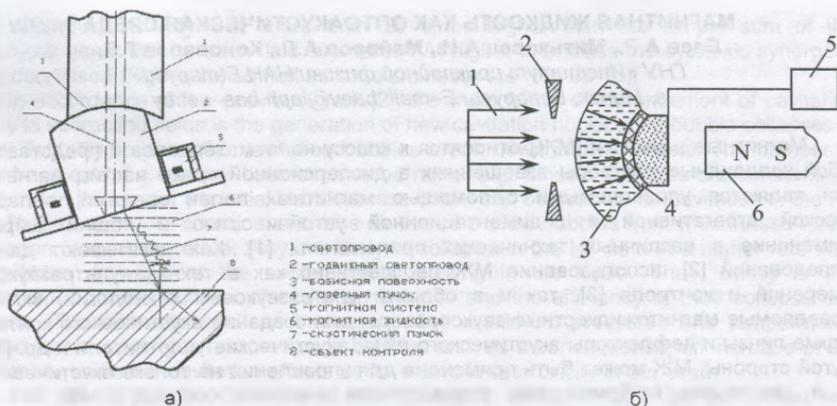


Рисунок 1 – Принципы использования МЖ для изменения угла ввода в объекты УВ, возбуждаемых лазерным импульсом (а), и измерения интенсивности лазерного излучения: а) 1 – лазерный луч, 2 – диафрагма, 3 – МЖ; 4 – пьезопреобразователь, 5 – приемник электрических колебаний, 6 – магнитная система

Проведены экспериментальные исследования по возбуждению упругих волн в МЖ и исследованию их спектральных характеристик. Часть настоящей работы выполнена на базе Международного лазерного центра при МГУ им. М. Ломоносова с участием доктора физ-мат. наук, профессора Карабутова А.А. и использованием его методической разработки [5]. Схема экспериментальной установки содержит источник лазерного излучения с системой коррекции и двух кварцевых призм (одна из которых наклонная), между которыми размещен слой МЖ. На внешних основаниях призм установлены широкополосные преобразователи, сигнал с которых подается на усилительный блок, а затем на осциллограф и блок согласования с выходом на компьютер. Лазерный импульс, проникая в МЖ, затухает в результате поглощения и рассеяния излучения, преобразуясь в УВ. Амплитудные и спектральные характеристики последних анализируются с помощью специальной программы, а затем производится пространственное восстановление функции поглощения излучения  $\alpha(z)$ . Дополнительно были получены спектральные характеристики коэффициента экстинкции  $\alpha_{ex}$  монохроматического амплитудно-модулированного сигнала в диапазоне длин волн  $\lambda_1=0,4-1,06 \mu$ .

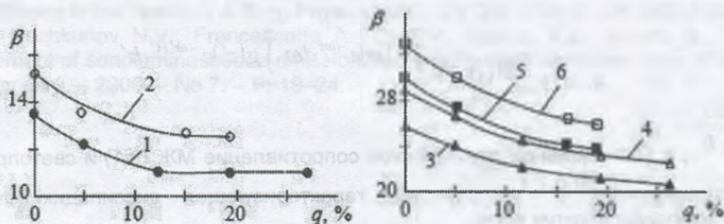


Рисунок 2 – Зависимости углов падения волны в МЖ для возбуждения в стали подповерхностных продольных (1, 2 –  $\beta=\beta_1$ ) и поперечных волн (3, 5 –  $\beta=\beta_2$ ), а также волн Рэлея (4, 6 –  $\beta=\beta_{ПAB}$ ). Основа МЖ: керосин (1, 3, 4); трансформаторное масло (2, 5, 6)

В результате исследований установлено, что функция ОА-преобразования на границе кварц-МЖ имеет максимум от Q, который лежит в окрестности  $8\% < Q < 13\%$ . Причем зависимости  $A(Q)$  для образцов МЖ на керосине и масле смещены друг относительно друга относительно оси Q. Это различие вызвано преимущественно

более значимым влиянием на ОА–преобразование удельного акустического сопротивления коллоида R1, от которого зависит как коэффициент звукопрозрачности границы МЖ–световод, так и генерируемое при поглощении лазерного излучения в жидкости давление  $p = \rho c v = R_1 v$ , где  $v$  – скорость колебаний частицы МЖ. Характерный концентрационный диапазон, в котором амплитуда сигнала–отклика достигает  $\sim 0,8$  от максимума, составляет всего (3–4)%. Максимум же лежит в окрестности  $Q \rightarrow 0$ , где  $\alpha$  возрастает по закону, близкому к линейному вплоть до  $Q \sim 1$ , если основа масло. Ввиду того, что коэффициент затухания в МЖ возрастает с ростом концентрации магнетика [4], то при использовании МЖ в качестве контактной среды рекомендуется выбирать величину  $Q$  минимальной. Необходимо отметить, что при  $Q = Q^* \geq 2\text{--}3\%$  функция ОА–преобразования имеет такой же спектр, как у лазерного импульса – т.е. реализуется длинноволновой режим ОА–преобразования [5]. При этом соответствующее уравнение ОА–преобразования упрощается, т.к. не зависит от  $\alpha$  и  $A(Q) \sim J_0 D R_1 Y_{OA}$ . Изменение же спектра акустического сигнала в этом случае (что весьма важно для структуроскопии материалов) может быть достигнуто путем управления длительностью лазерного импульса. Если же  $Q = Q^* < 0,5\%$ , то реализуется режим «короткого импульса», при котором спектр акустического сигнала существенно расширяется, т.к. длительность сигнала–отклика увеличивается из–за более глубокого проникновения света в коллоид на расстояние  $b \sim 3(\alpha_1)^{-1}$ . Именно в этом случае представляется возможным управлять спектральными характеристиками УВ путем воздействия на структуру приповерхностного слоя коллоида и поглощение света с помощью электрического и магнитного полей.

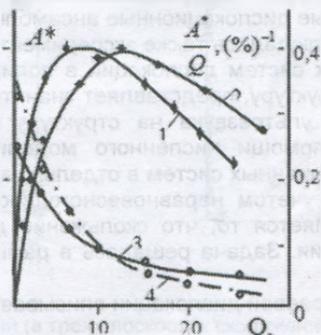


Рисунок 3 – Нормализованная функция ОА–преобразования  $A^*(1,2)$  и функция  $A^*/Q$  (3,4) от  $Q$ : основа керосин (1, 3) и масло (2, 4)

Работа выполнена при поддержке БРФФИ Т15–163.

#### Список литературы:

1. Блум Э.Я., Майоров М.М., Цеберс А.О. Магнитные жидкости. – Рига, Зинатне, 1989. – 389 р.
2. Baev A.R., Prokhorenko P.P., Asadchaya M.V. Physical principles of magnetic fluid guides used for nondestructive testing. Review of Quantitative Nondestructive Evaluation, 2004, New York, USA. –Vol. 23. – P.91–96.
3. Патент на изобретение РБ № 42013, Баев А.Р., Гуделев В.Г., Митьковец А.И. Способ оптоакустического контроля границы соединения материалов, публ. 30.08.13 Полож. реш. по заявке на ПМ №20130345 от 18.04.13.
4. Bayeu A., Prokhorenko P., Alexseuk A. Influence of the Dispersive Phase on the Ultra–sonic Wave Attenuation Coefficient in Magnetic Fluids Under Magnetic Field Impact, Journal of Engineering and Thermophysics, 2007, Holland. – V. 80, No. 5. – pp. 133 – 140.
5. Гусев В.Е. Карабутов А.А. Оптоакустика. – Москва, «Наука», 1999. – 394 с.