АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Том XXXIII 1987 Вып. 2

УДК 534.222

К ВОПРОСУ О РЕГИСТРАЦИИ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК КОРОТКИХ АКУСТИЧЕСКИХ ИМПУЛЬСОВ, ВОЗБУЖДАЕМЫХ ОПТИЧЕСКИМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

Овчинников О. Б., Пашин А. Е., Пученков О. В., Расторгуев Д. Л.

Рассматривается методика регистрации пространственно-временных характеристик коротких акустических импульсов, возбуждаемых оптическим излучением, с помощью широкополосного датчика давления с чувствительным элементом из поливинилиденфторида.

В последнее время большое внимание уделяется исследованию акустических импульсов, возбуждаемых в конденсированных средах оптическим излучением («оптоакустических» импульсов). Дальнейший прогресс исследований связан с созданием экспериментальной методики, позволяющей регистрировать короткие оптоакустические (ОА) импульсы с высоким пространственно-временным разрешением. Такая методика особенно актуальна для решения задач динамической ОА-диагностики (см., например [1]), создания адекватной физической модели испарительного механизма генерации звука в жидкости и т. д. Существуют методики регистрации коротких ОА-импульсов с использованием различного рода контактных датчиков давления, а также с использованием пробного лазерного луча. Последние к настоящему времени не получили широкого распространения из-за невысокого пространственного разрешения и трудностей применения в сложных экспериментальных ситуациях. В качестве широкополосных приемников ОА-импульсов, спектр которых лежит в диапазоне от сотен килогерц до десятков мегагерц, сравнительно недавно стали применяться датчики давления, изготовленные на основе тонких пьезополимерных пленок [2]. Авторы работы [3] регистрировали ОА-импульсы в полосе до 10 МГц с помощью высокочастотного пьезоэлектрического датчика, в котором использована текстурированная пленка органического полициклического соединения. Реализуемое в таких измерениях значение чувствительности пьезодатчика оценивается в 0,1 мкВ/Па (сведений о его частотной характеристике в работе не содержится).

В настоящей работе показано, что значительно повысить чувствительность регистрации ОА-импульсов и обеспечить возможность точного восстановления их пространственно-временных характеристик (в указанном диапазоне частот) можно с помощью сравнительно простой конструкции датчика с активным элементом из пьезополимерной пленки марки Ф2-МЭ на основе поливинилиденфторида (ПВДФ), особенности которой описаны в работе [4]. По данным проведенных нами измерений пьезомодуль пленки составляет $d_{33}=15\cdot10^{-12}$ Кл/Н, скорость продольных звуковых волн $C_l=1{,}6\cdot10^3$ м/с, относительная диэлектрическая проницаемость $\varepsilon=12$.

Принципиальная конструкция датчика включает в себя цилиндрический протяженный демпфер (который в зависимости от требований, накладываемых на частотные свойства датчика, может быть изготовлен из материалов с различным акустическим импедансом (эбонит, оргстекло, латунь и т. д.)) и чувствительную ПВДФ-пленку площадью порядка 1 мм^2 и толщиной 10÷30 мкм, которая равномерно зажимается между тщательно обработанными плоскостями торцевой поверхности демпфера и специальной накладки из оргстекла. На этих плоскостях в виде тонких полосок напылены электроды, обеспечивающие съем с пьезопленки электрического сигнала, который с целью получения максимально высокого соотношения

сигнал/шум и оптимального согласования датчика со схемой регистрации поступает на предусилитель, расположенный непосредственно в корпусе датчика (внешний вид датчика приведен на фиг. 1).

Применение традиционных методик калибровки гидрофонов по гармоническому сигналу излучателя с плавной перестройкой частоты для исследования спектральной чувствительности изготовленного нами датчика в широкой полосе частот сопряжено со значительными техническими трудностями. В работе [3] чувствительность широкополосного датчика определялась путем сравнения амплитуды экспериментально регистрируемого короткого ОА-импульса с теоретически рассчитанной. Однако такой способ не дает представления о поведении чувствительности во всем диапазоне исследуемых частот. В работе [5] указано на принципиальную возможность использовать в целях калибровки непрерывный акустический сигнал, генерируемый световым пучком, интенсивность которого модулирована во времени по гармоническому закону.

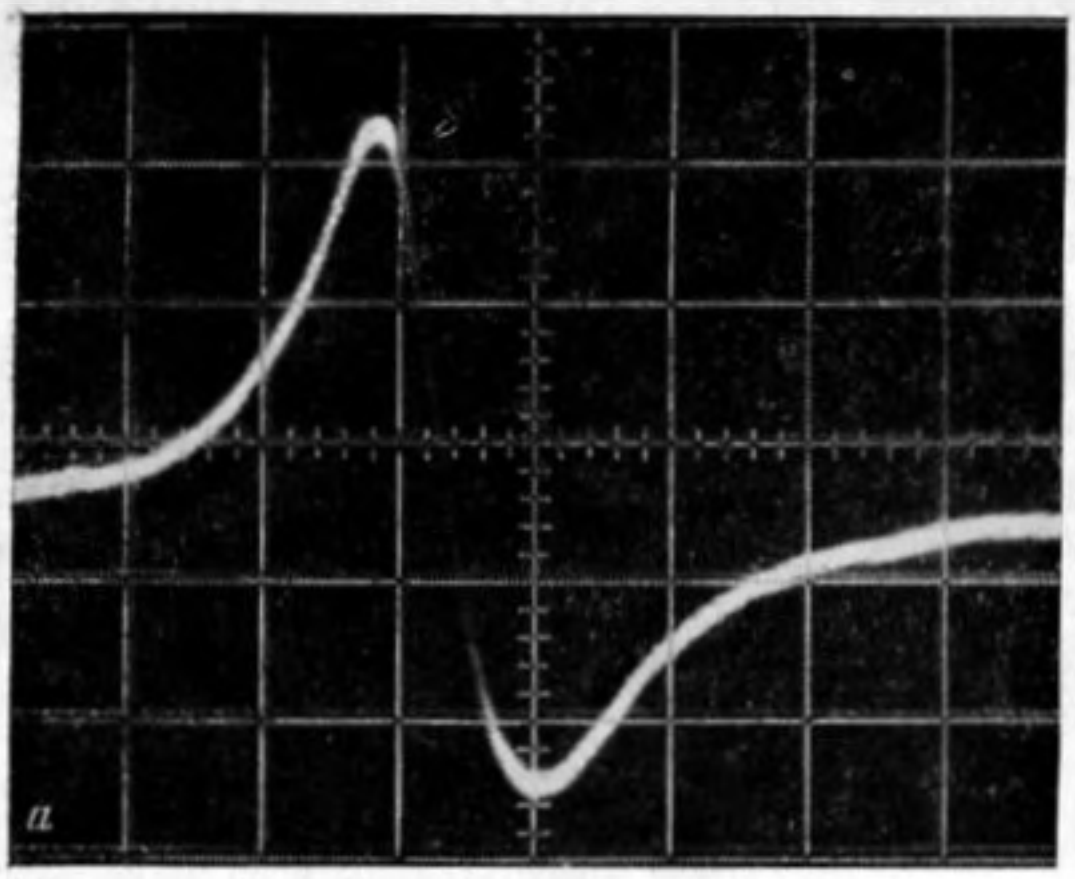
Фиг. 1. Внешний вид датчика

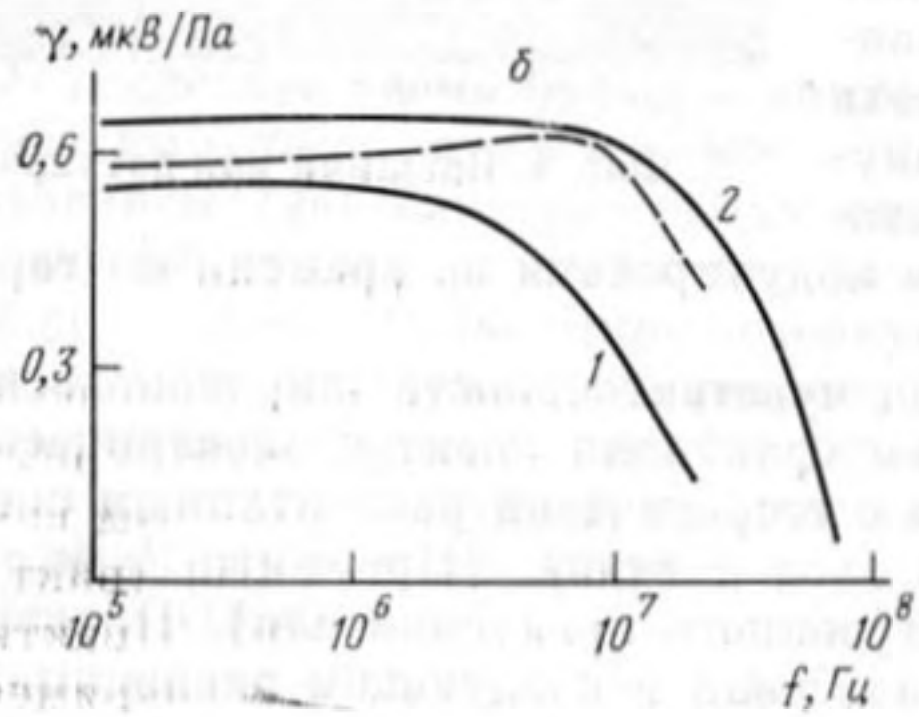
В настоящей работе спектральная чувствительность широкополосного датчика определялась по результатам сравнения спектра электрического сигнала на выходе приемного тракта с теоретически рассчитанным спектром ОА-импульса, поступающего на вход датчика. (Приемный тракт состоит из собственного датчика и встроенного предусилителя). Практически этот способ калибровки был реализован в следующем эксперименте. Излучение лазера (длина волны 1,06 мкм) направлялось в кювету с водным раствором $CuCl_2$ (коэффициент оптического поглощения $\alpha=(190\pm\pm20)$ см$^{-1}$). Длительность лазерного импульса составляла $\vartheta=30$ нс при гауссовой форме огибающей интенсивности. Распределение интенсивности в поперечном сечении лазерного луча также хорошо аппроксимировалось по гауссовому закону. Регистрация акустического импульса проводилась на расстояниях от поверхности $z\leqslant z_D=a^2/(2c\vartheta)$, где a — эффективный радиус светового пятна, c — скорость звука в жидкости. Таким образом, спектр импульса, не искаженный дифракционными эффектами, может быть рассчитан теоретически по формулам для одномерной модели генерации (см., например, [5]):

$$P(\omega)=i\frac{2\alpha\beta}{C_p}\frac{E_0}{\pi a^2}\vartheta c^2\left\{\frac{\omega\vartheta\exp(-[\omega\vartheta/2]^2)}{(\alpha c\vartheta)^2+(\omega\vartheta)^2}\right\}\exp[-ikz], \qquad (1)$$

где β — коэффициент объемного расширения, C_p — удельная теплоемкость жидкости, E_0 — полная энергия в лазерном импульсе, k — волновое число. Форма электрического сигнала на выходе приемного тракта регистрировалась с помощью запоминающего осциллографа (осциллограмма на фиг. 2, *а*), а его спектр находился по алгоритму быстрого преобразования Фурье. Модуль отношения найденного спектра к рассчитанному спектру ОА-импульса в ближнем поле (формула (1)) дает спектральную чувствительность приемного тракта (фиг. 2, *б*, кривая *1*).

Для сравнения был проведен теоретический расчет, в котором для нахождения спектральной чувствительности датчика использован подход, изложенный в [6]. При описании датчиков, работающих на толщинной моде колебаний (так называемые «thickness-mode»-датчики), обычно пользуются плоскослоистой моделью, в которой их механические свойства зависят только от одной координаты (фиг. 3, индекс А относится к падающей волне в соответствующем слое, В — к отраженной). В рамках этой





Фиг. 2. *а* – форма отклика датчика (с демпфером из оргстекла) на ОА-импульс на расстояниях от поверхности, малых по сравнению с дифракционной длиной z_D, масштаб по горизонтали 50 нс/дел; *б* – спектральная чувствительность приемного тракта: *1* – по данным ОА-калибровки для датчика с накладкой из полиметилметакрилата (толщиной 4 мм); *2* – по результатам расчета. Пунктиром показан ход кривой *1* в случае отсутствия поглощения звука в материале накладки. Толщина ПВДФ-пленки 20 мкм

модели спектральная чувствительность пьезодатчика $\gamma(\omega)$ описывается следующим выражением:

$$\gamma(\omega)=\left|\frac{ShT_FK_F(\omega)U(\omega)/(\omega Z_c)}{1+h^2(K_F(\omega)T_F+K_B(\omega)T_B)U(\omega)/(2\omega^2Z_cZ_E(\omega))}\right|. \qquad (2)$$

В этой формуле $h=h_{33}$ – пьезоэлектрический модуль (размерность Н/кл); $K_F(\omega)$ и $K_B(\omega)$ – реверберационные факторы, характеризующие процессы прохождения-отражения в плоскослоистой структуре:

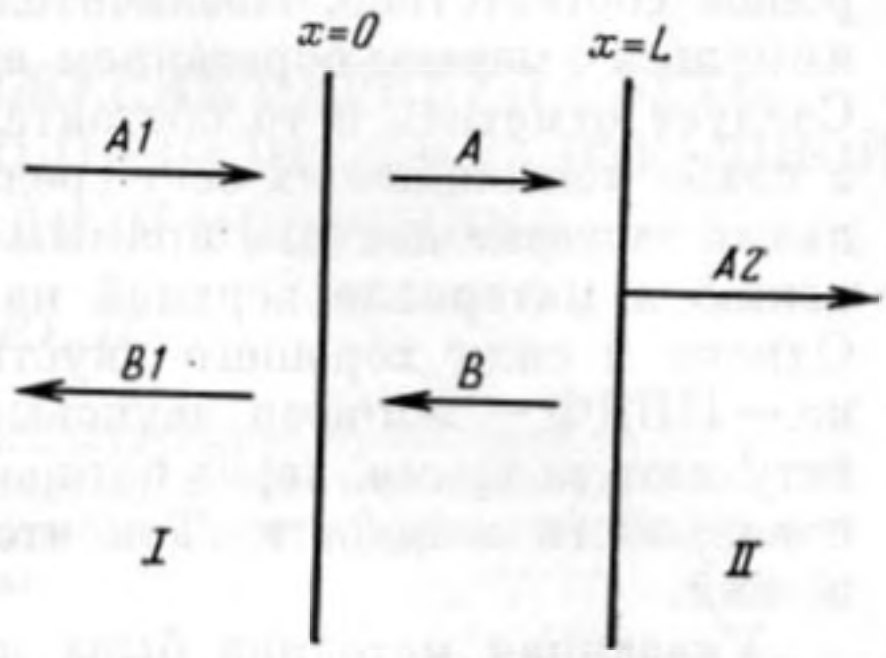
$$K_{F,B}(\omega)=\frac{(1-e^{i\omega\tau})(1-R_{B,F}e^{-i\omega\tau})}{(1-R_FR_Be^{-i2\omega\tau})}.$$

Коэффициенты отражения: $R_{B,F}=Z_c-Z_{2,1}/Z_c+Z_{2,1}$, прохождения: $T_{F,B}=2Z_c/Z_c+Z_{1,2}$, где Z_c, Z_1, Z_2 – акустические импедансы пьезоматериала, первой и второй сред, домноженные на площадь поперечного сечения датчика S. Время пробега звуковой волны через пьезополимерную пленку толщины L, составляющую чувствительный элемент датчика, $\tau=L/v_c$ (v_c – скорость продольных звуковых волн в пьезоматериале). Коэффициент передачи по напряжению $U(\omega)=i\omega C_0Z_E(\omega)/1+i\omega C_0Z_E(\omega)$, где $Z_E(\omega)$ – импеданс произвольной электрической нагрузки, на выходе которой измеряется напряжение, C_0 – собственная статическая емкость датчика.

Следует отметить, что для пьезоматериалов с малым коэффициентом электромеханической связи $k^2=h^2C_0\tau/Z_c\ll1$ (к их числу относится и ПВДФ, для которого $k^2\simeq0{,}01$) знаменатель в формуле (2) практически равен единице. Кроме того, применение специальных схем предусилителей (типа FET-probe) позволяет в диапазоне частот от десятков килогерц до сотен мегагерц считать коэффициент передачи $U(\omega)$ не зависящим от частоты: $U(\omega)=U_0$. Поэтому для частот, удовлетворяющих соотношению

$\omega\tau \ll \min(1, (1-R_B)/R_B)$, формула (2) переходит в $\gamma=(2h\tau SU_0)/Z_c(1+Z_1/Z_2)$.

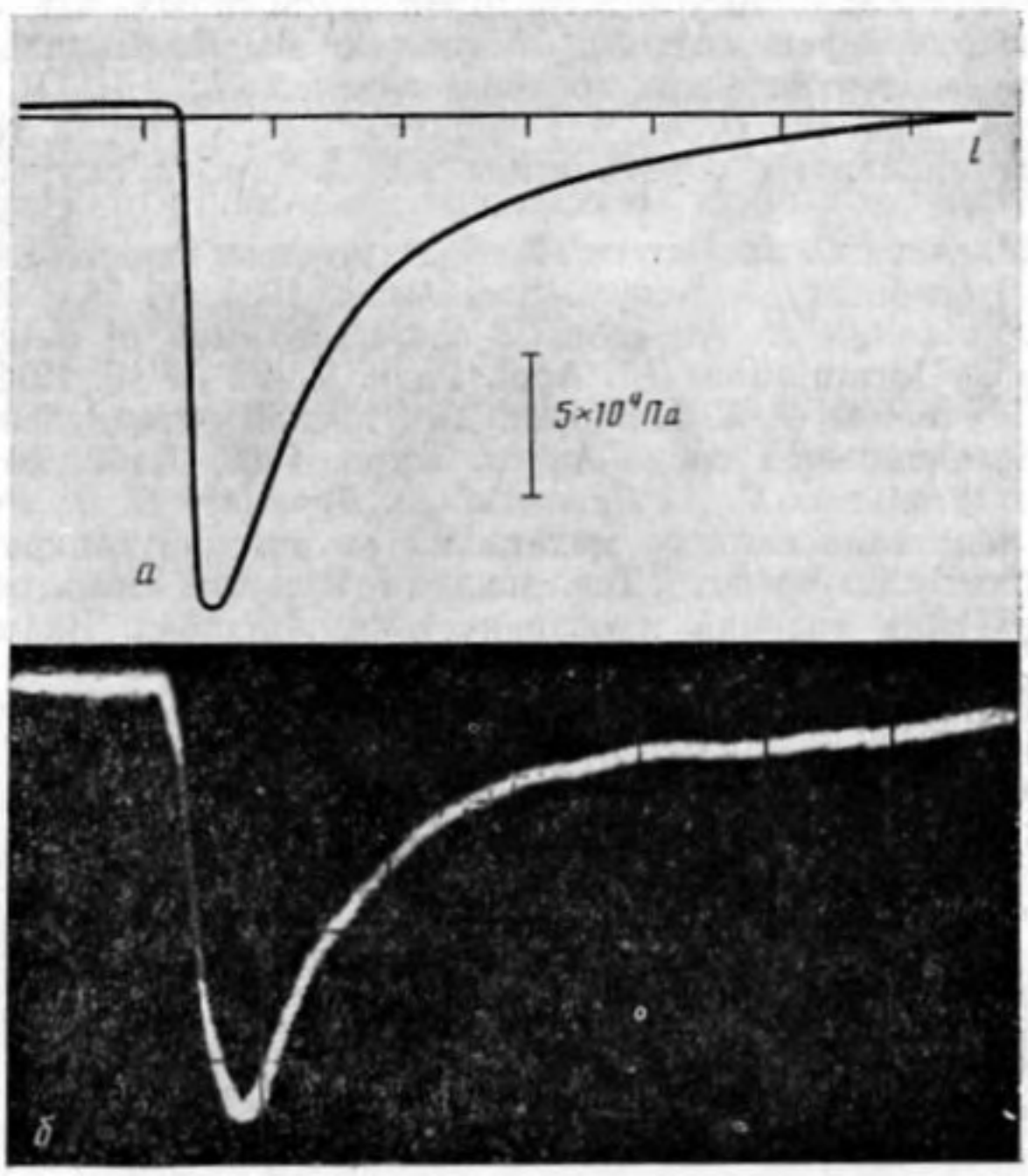
По данным работы [7], учитывалось поглощение высокочастотного звука в полиметилметакрилате, что позволило определить чувствительность приемного тракта при отсутствии поглощения (пунктирная кривая на фиг. 2, *б*) и сравнить ее с расчетной спектральной чувствительностью, найденной по формуле (2) (фиг. 2, *б*, кривая *2*). Следует отметить, что расчетная спектральная чувствительность соответствует в пределах точности измерений (~20%) данным ОА-калибровки.



Фиг. 3. Акустическая схема датчика согласно «плоскослоистой» модели. Слой пьезоматериала толщины L заключен между однородными средами I и II

Среднеквадратичное значение шума приемного тракта, приведенное ко входу датчика, составляет величину 200 Па в полосе частот от 100 кГц до 30 МГц. За счет уменьшения толщины пленки возможно существенно расширить диапазон измеряемых частот при соответствующем уменьшении чувствительности. Однако ввиду сильного поглощения в жидкости звука высоких частот можно при решении реальных задач оптоакустики ограничиться рассмотрением указанной выше полосы частот.

Методика регистрации ОА-импульсов, основанная на применении описанного датчика, оказалась эффективной при исследовании разгрузки давления области энерговыделения в слабо поглощающих свет средах. Исходя из основных принципов расчета, изложенных в [8], была теоретически определена форма импульса давления в точке наблюдения, расположенной на оси области энерговыделения, в случае, когда лазерное излучение имеет гауссово распределение интенсивности в поперечном сечении луча



Фиг. 4. Теоретически рассчитанный (*а*) и экспериментально зарегистрированный (*б*) ОА-сигналы. Коэффициент оптического поглощения $\alpha \approx 5$ см$^{-1}$, глубина точки наблюдения – 10 мм, радиус поперечного сечения лазерного луча – 3 мм. Масштаб по горизонтали – 200 нс/дел

(фиг. 4, *а*). Осциллограмма экспериментально зарегистрированного импульса, соответствующего расчетному, приведена на фиг. 4, *б*. (В эксперименте использован лазер на алюмоиттриевом гранате, длительность лазерного импульса составляла ~30 нс, энергия в импульсе ~0,1 Дж.) Сравнение экспериментальных и теоретических результатов показывает их хорошее соответствие. Незначительное затягивание переднего фронта ОА-импульса вызвано обрезанием его спектра на частотах выше 40—50 мГц. Следует отметить и то обстоятельство, что при регистрации ОА-сигнала в слабо поглощающих свет средах непосредственно в области энерговыделения засветка датчика прямым лазерным излучением приводит к возбуждению в материале верхней накладки мощного акустического сигнала. Однако в силу хорошего акустического согласования в системе накладка — ПВДФ — демпфер звуковые колебания в ПВДФ-пленке полностью затухают за время, через которое в точку наблюдения приходит сигнал от поверхности жидкости. Так что этот сигнал регистрируется без искажений.

Указанная методика была использована также в ряде других задач (например, при дифференциации вкладов объемных и поверхностных источников в процесс испарительной генерации звука в жидкостях с сильным поглощением света [9]). В перспективе предполагается применить ее для решения различных задач динамической ОА-диагностики, в том числе ее биомедицинских приложений.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Дунина Т. А., Егерев С. В.* О возможностях динамической диагностики термодинамических неоднородностей сред оптоакустическими методами // Проблемы нелинейной акустодиагностики. Таллин: Валгус, 1986.
2. *Tam A. C., Coufal H.* Pulsed optoacoustics: theory and applications // Physique, Colloque C6, Supplement au № 10. 1983. T. 44.
3. *Божков А. И., Бункин Ф. В., Галстян А. М. и др.* Наблюдение нелинейноакустических эффектов в жидкости при распространении звука от импульсного термооптического источника // Акуст. журн. 1982. Т. 28. № 3. С. 321–323.
4. *Бенькова Л. Ф., Модорская Л. Я., Эйдельмант М. П.* Поливинилиденфторидные пленки для пьезоэлектрических преобразователей. Л.: ЛДНТП, 1980.
5. *Карабутов А. А., Руденко О. В., Черепецкая Е. Б.* К теории термооптической генерации нестационарных акустических полей. // Акуст. журн. 1979. Т. 25. № 3. С. 383–394.
6. *Hayword G., MacLeod C. J., Durrani T. S.* A systems model of the thickness mode piezoelectric transducer // J. Acoust. Soc. Amer. 1984. V. 76. № 2. P. 369–382.
7. *Sutherland H. J., Lingle R.* An acoustic characterization of polymethylmethacrylate and three epoxy formulations // J. Appl. Phys. V. 43. № 10. 1972. P. 4022–4026.
8. *Егерев С. В., Пученков О. В.* К теории импульсной оптоакустической спектроскопии слабо поглощающих сред // Акуст. журн. 1986, Т. 32. № 1. С. 50–54.
9. *Егерев С. В., Наугольных К. А., Пашин А. Е., Пученков О. В., Участнов В. Н.* К исследованию комбинированного механизма оптической генерации звука в сильнопоглощающих свет средах // Тез. докл. IV Всесоюз. симп. по физике акустико-гидродинамических явлений и оптоакустике. Ашхабад. Изд-во АН ТССР, 1985.

Акустический институт
им. Н. Н. Андреева
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
24.IV.1986