

НОВЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПО СВЕТО-ТЕРМОАКУСТИКЕ

Г.А. Аскарьян, А.В. Юркин

Впервые исследовано направленное распространение звука по следу светового луча в среде. Выявлено большое время жизни теплового и пузырькового светового следа и большие перепады акустических свойств пузырьковых звуководов. Экспериментально исследовано также свето-акустическое обнаружение и исследование неоднородностей в прозрачных и мутных средах. Указаны возможные применения.

В последнее время детально исследуются светоакустические и нелинейноакустические эффекты (см., например, обзоры ¹⁻³). В данной работе впервые наблюдается направленное распространение звука по следу светового луча, предложенное в ⁴, и исследована возможность свето-акустической интроскопии. Эксперименты выполнены на неодимовом лазере, луч которого через окно проходил в 50 л бак с водой (см. рис. 1). Лазер работал в режиме свободной генерации (с энергией 300 Дж) без и с поджатием луча телескопом или в режиме генерации гигантских импульсов при модуляции твердотельным пассивным затвором на LiF с F-центрами с энергией в каждом импульсе 10 Дж без поджатия луча, а также в луче второй гармоники.

В качестве среды использовалась техническая вода, вода с поглощающими взвесями V_4C или сажи, или твердотельные среды (плексиглас и т.д.).

Пьезокерамические датчики (приемники или излучатели) в виде дисков диаметром $0,5 \div 1$ см имели резонансную частоту $f = 1$ МГц и 60 кГц.

1. Транспортировка звука по следу трубчатого светового луча. (Светозуковод).

Лазерный луч изменял акустические свойства среды ⁴, что уменьшало расхождение звуковых волн из-за рефракции и отражения. Изменение акустических свойств может быть связано, в основном, с двумя факторами: нагревом среды или образованием пузырьков. При нагреве изменение скорости звука $\Delta c_s = \frac{dc_s}{dT} \Delta T$, причем для воды в широком диапазоне температур $\frac{dc_s}{dT} \cong 4 \div 5$ м/с · град > 0 , при появлении пузырьков (для простоты – без учета затухания их колебаний)

$$c_s^{-2} = c_{s0}^{-2} + \frac{na}{\pi(f_r^2 - f^2)}; \quad \Delta c_s = - \frac{anc_s^3}{2\pi(f_r^2 - f^2)};$$

где a – средний радиус пузырьков, n – концентрация, c_s – скорость звука, f – его частота; резонансная частота колебаний пузырька $f_r = \frac{1}{2\pi a} \left(\frac{3\gamma p_0}{\rho} \right)^{1/2}$, p_0 – внешнее гидростатическое давление, γ – постоянная адиабаты газа в пузырьке, ρ – плотность жидкости.

Эксперимент (см. рис. 1, а) был проведен с помощью трубчатого луча (1) лазера. Уменьшение интенсивности света вблизи оси создавалось шайбой (2) диаметром 0,5 см, помещенной до входного окна бака. На оси луча помещались излучатель (3) звука и на расстоянии 35 см – приемник (4). Шайба (2) была акустически изолирована от бака.

В чистой воде в режиме свободной генерации лазера поджатием телескопом была сразу получена подфокусировка звука в тепловом следе. Трубчатый лазерный луч нагревал воду на $\Delta T \cong Q_1 / C\rho L_a \sim 10^0$, при плотности падающей энергии $Q_1 \cong Q / \pi(R_1^2 - R_2^2)$ в поджатом луче при $C\rho \cong 4$ Дж/см³ и глубине поглощения $L_a \cong 6$ см, что давало $\frac{\Delta c_s}{c_s} \cong 3 \cdot 10^{-2}$. Такое изменение показателя преломления звуковых волн Δn_s обеспечивало отражение звука внутрь для углов $\theta \sim \sqrt{\Delta n_s} \cong 0,2$ рад. Угол дифракционной расходимости звукового луча $\theta_s \ll \lambda_s / d \ll \ll 0,3$ рад, т.е. обеспечивались условия захвата звукового луча.

Поскольку приемник находился на расстоянии, в несколько раз превосходящем длину поглощения, поджатие обеспечивалось не на всей длине трассы. Без поджатия пятно звукового луча на расстоянии L было $d_0 + \theta_s L$, при поджатии на части трассы L_1 , радиус пятна $d_0 + \theta_s(L - L_1)$, таким образом для малых начальных размеров амплитуда звука усиливалась бы в $L/(L - L_1)$ раз. В нашем случае при $L \cong 35$ и $L_1 \cong 10$ см ожидалось усиление звука в 1,5 – 2 раза. Эксперимент дал усиление амплитуды в два раза. На рис. 2 даны осциллограммы сигнала с пьезоприемника: *а* – для лазера в режиме свободной генерации с поджатием луча телескопом.

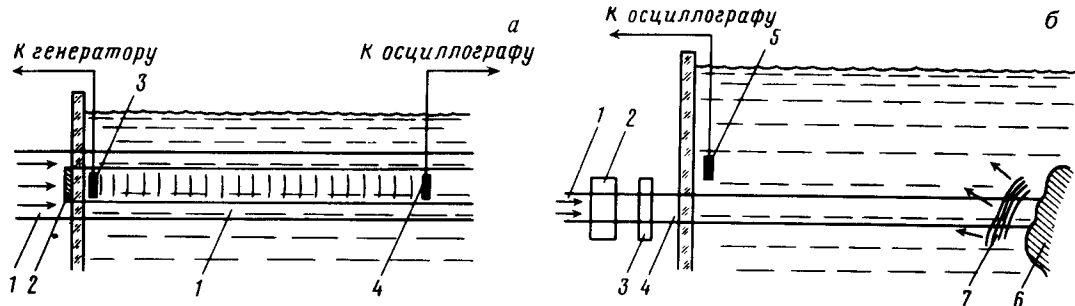


Рис. 1. Схема эксперимента: *а* – транспортировка звука по следу луча лазера, *б* – свето-акустическое обнаружение неоднородностей

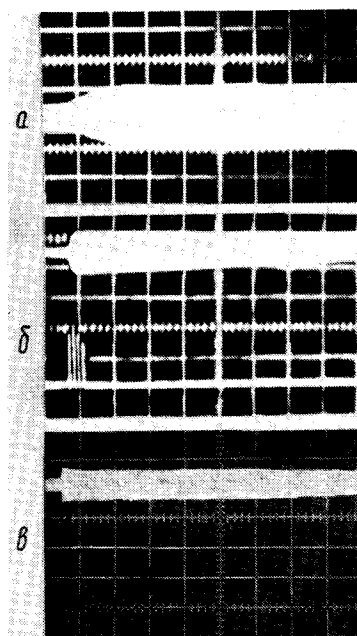


Рис. 2

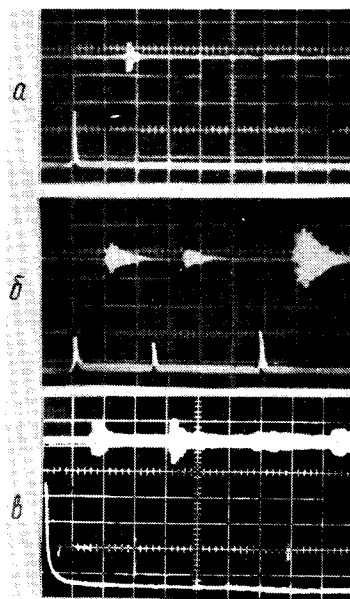


Рис. 3

Рис. 3. Сигналы свето-акустического обнаружения тел в средах в луче зеленого света: нижние развертки – лазерные импульсы, верхние – с пьезоприемника, *а* – лоцирование объекта в воде гигантскими лазерными импульсами (разв. 100 мкс/дел), объект – цилиндр из черненого металла. *б* – сигналы от резинового покрытия (разв. 50 мкс/дел), *в* – сигналы при вертикальном воздействии луча на фронт придонного слоя ила – первый импульс – от термозвука при поглощении света на границе слоя, второй – от звука, прошедшего внутрь слоя и отраженного от дна: $h_1 = 10$ см, $h = 19$ см. Развертка 50 мкс/дел

Рис. 2. Сигналы с пьезоприемника при транспортировке звука по следу лазерного луча: *а* – начало усиления звукового поля (разв. 0,5 мс/дел) *б, в* – подфокусировка пузырьковым следом лазерного луча в режиме гигантского импульса в среде с взвесями, *б* – начало усиления (разв. 1 мс/дел), *в* – подфокусировка звука с частотой 60 кГц в свежей водопроводной воде (разв. 25 мс/дел). Запуск развертки до импульса лазера

Дано начало усиления (развертка 0,5 мс/дел) — длительность усиления доходила до 1 с, т.е. звукопроводящий след возникает быстро (за время лазерного импульса), а живет очень долго, пока конвекция не уберет его из звукового луча.

Для создания пузырькового следа луча использовался лазер в режиме гигантских импульсов. Неподжатый трубчатый луч проходил через воду, замутненную взвесьями, служащими центрами рождения пузырьков при импульсном локальном нагреве (малые размеры взвесей обеспечивались большим временем оседания ~ 3 дней). Пузырьки могли вырастать за счет растворенного газа. Этот вид звуковода обеспечивал большие перепады акустических свойств, а требовал для создания малых погонных энергозатрат. Осциллограммы подфокусировки звука для этого случая даны на рис. 2, б и в. б — Начало подфокусировки (разв. 1 мс/дел), в — усиление длится долго $\sim 0,5$ с, пульсируя с периодом 50 мс. Отметим, что рабочим частотам $f \cong$ МГц соответствуют по резонансу пузырьки с размером доли микрон, т.е., по-видимому, подфокусировке соответствует увеличение скорости звука в следе ($f > f_r$). Но и в случае обратного знака изменения скорости возможно усиление из-за отражения на границе скачка, так как скачок нельзя считать плавным. Пульсации пузырьков могут быть связаны не только с изменением размеров пузырьков, но и с колебаниями слоя пузырьков.

Способность жидкости выделять газ и сильное влияние этого на скорость звука позволили осуществить транспортировку и захват даже звука с частотами 60 кГц и большой расходимости — см. рис. 2, в (разв. 25 мс/дел).

При перестановке пьезоэлементов было наблюдеено усиление приема при светотермосоздании приемного звуковода и концентратора у приемного датчика (радиоаналог см. 5).

Наблюдаемые явления могут проявиться или быть использованы для управления звуковым потоком при вынужденном манделштам-бриллюэновском рассеянии: формируя профиль световой интенсивности можно вызвать расфокусировку или фокусировку звука, изменив длины взаимодействия и нелинейные воздействия звука на среду.

2. Свето-термозвуковое обнаружение и исследование неоднородностей в прозрачных и мутных средах.

Обнаружение неоднородностей в средах по отражению света затруднено в случае, когда слой среды мутный или неоднородности сильно поглощают или не отражают свет. В этом случае можно использовать свето-термоакустику (ср. аналог 1, 3), т.е. лоцировать объект по звуковому импульсу, возникающему при поглощении света поверхностью объекта или границей поглощающего слоя. Была экспериментально исследована такая свето-звуковая интроскопия (горизонтальный вариант, см. рис. 1, б). Лазер в режиме модуляции добротности давал гигантские импульсы в луче (1) с энергией 10 Дж, проходящие через кристалл КДП (2) и фильтр СЗ (3), отсекающий основную гармонику. Зеленый луч (4) проходил в бак с водой, в котором были помещены пьезоприемник и темные металлические и диэлектрические тела (6). По запаздыванию прихода к датчику (5) звукового импульса (7) после лазерного определялось расстояние до тела. Природа звукового импульса могла быть связана с тепловым расширением или вскипанием жидкости у поверхности тела.

На рис. 3 даны осциллограммы лазерных импульсов (нижний луч) и сигналов с пьезоприемника (верхний луч). а — Сигнал от черненного металлического цилиндра диаметром 10 см, находящегося на расстоянии 30 см (развертка 100 мкс/дел). Было наблюдеено резкое увеличение сигнала при подфокусировке луча.

На рис. 3, б даны сигналы от резинового покрытия, находящегося на расстоянии 8 см (развертка 50 мкс/дел). Сигнал аномально большой, что может быть связано с большим поглощением, малой теплопроводностью, шероховатостью поверхности или ее газацией при нагреве.

Были наблюдеены также сигналы обнаружения поглощающих неоднородностей в объеме и на поверхности плексигласа.

Светоакустическая интроскопия может быть осуществлена и в случае, когда неоднородность находится в области среды, не прозрачной для света (например, в придонном слое ила, мягкого грунта и т.д.). Тогда на границе поглощения света возникнут акустические импульсы

распространяющиеся от и внутрь границы, например, вверх и вниз. Импульс вверх придет с запазданием $t_1 = h_1/c_s$, где h_1 — глубина границы поглощения. Импульс, идущий вниз, отразится от дна или объекта и придет с запаздыванием $t_2 = [h_1 + 2(h_2 - h_1)]/c_s = (2h_2 - h_1)/c_s$, где h_2 — искомая полная глубина дна или залегания неоднородности. Зная t_1 и t_2 , можно определить $h_2 = \frac{1}{2} (t_1 + t_2) c_s$ для любых h_1 .

В эксперименте зеленый луч лазера падал сверху на поверхность воды в баке, вблизи дна которого в слое толщиной 9 см вода была замутнена поглощающими золями. Глубина фронта поглощения $h_1 \cong 10$ см, идущий вверх термозвук от фронта давал первый импульс (см. рис. 3, в), идущий вниз звук шел по замутненному следу, отражался от дна, шел вверх и давал второй импульс. Величина $\frac{1}{2} (t_1 + t_2) c_s$ оказалась весьма близка к полной глубине воды.

Описание исследования могут быть использованы для свето-звуковой интроскопии и локализации неоднородностей в жидких, твердых и газообразных средах для контроля однородности сред и т.п., а также для создания свето-звукового микроскопа и свето-звуковых голографических систем. Интересно отметить, что расхождение звукового отклика может быть уменьшено при использовании иницирующего светового луча с приосевым уменьшением интенсивности, обеспечивающим обратную транспортировку звука.

Литература

1. Лямшев Л.М. УФН, 1981, 135, 637.
2. Бункин Ф.В., Комиссаров В.М. Акустический журнал, 1973, 19, 305.
3. Новиков Б.К., Руденко О.В., Тимошенко В.И. Кн. Нелинейная гидроакустика, Л-д, Судостроение, 1981.
4. Аскарьян Г.А. Письма в ЖЭТФ, 1966, 4, 144.
5. Аскарьян Г.А., Раевский И.М. Письма в ЖТФ, 1982, 8, 1131.

Институт общей физики
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
16 января 1986 г.