

03;07;08;12

## ЭФФЕКТИВНОСТЬ ФОКУСИРОВКИ СУБМИКРОСЕКУНДНЫХ ИМПУЛЬСОВ ДАВЛЕНИЯ В ВОДЕ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ РАДИАЛЬНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ИХ НАЧАЛЬНОЙ АМПЛИТУДЫ

© Ю.В.Судьенков, Э.В.Иванов

Согласно линейной теории [1], эффективность концентрации акустической энергии повышается при уменьшении длительности импульса. Методы лазерной оптоакустики позволяют возбуждать импульсы давления длительностью  $\leq 0.1$  мкс [2], что, как минимум, на порядок короче, чем в традиционных источниках сфокусированных ударных волн [3]. Однако при этом возрастает и роль нелинейных эффектов, совокупное влияние которых на фокусировку не является однозначным [1]. В этой связи исследование нелинейных процессов фокусировки таких импульсов представляет большой интерес.

Обычно как в теории, так и в эксперименте рассматривается лишь колоколообразное распределение начальной амплитуды, другие же профили практически не изучены. Между тем можно предположить, что данный фактор должен оказывать заметное влияние на процесс фокусировки, по крайней мере в условиях нелинейности.

В этой связи нами проведены экспериментальные исследования фокусировки в воде субмикросекундных импульсов для случая (рис. 1) колоколообразного (1) и кольцевого (2) профилей их начальной амплитуды. Предполагалось, что перераспределение акустической энергии из центральной области пучка на его периферию ослабит влияние нелинейных эффектов вследствие уменьшения максимального значения начальной амплитуды и в результате изменения ее поперечного профиля. Кроме того, при этом должен возрасти эффективный угол схождения пучка. Следовательно, переход от колоколообразного распределения к кольцевому должен улучшить условия фокусировки.

В эксперименте использовался лазерный оптико-акустический концентратор, основным элементом которого являлся твердый поглощающий слой толщиной  $\cong 0.3$  мм, нанесенный на сферически вогнутую поверхность подлож-

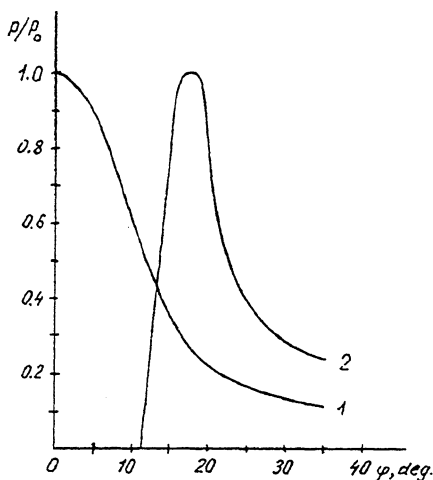


Рис. 1. Колоколообразный (1) и кольцевой (2) профили начальной амплитуды импульса давления ( $\varphi = \arcsin(r/R)$ ) — центральный угол,  $r$  — радиальная координата).

ки из оптического стекла (диаметр 110 мм, радиус кривизны  $R = 91$  мм). В этом слое происходило термоупругое преобразование лазерного импульса в акустический моноимпульс сжатия с длительностью по полувысоте 0.2 мкс. Материал поглощающего слоя был хорошо согласован по акустическому импедансу с водой, в которой и распространялся в дальнейшем акустический импульс.

В качестве источника оптического излучения использовался лазер модулированной добротности на неодимовом стекле (длина волны 1.06 мкм, длительность импульса по полувысоте 20 нс).

Давление в воде регистрировалось пьезокерамическим датчиком с чувствительной площадкой размером  $0.45 \times 0.45$  мм, сигнал с которого подавался на вход широкополосного осциллографа С8-14.

Для фазы сжатия импульса давления были получены распределения амплитуды по поверхности оптико-акустического концентратора (рис. 1), вдоль его оси (рис. 2, а) и в фокальной плоскости (рис. 2, б) для двух значений энергии лазерного импульса ( $E$ ). Параметры нормировки ( $p_0$  и  $p_f$ ), коэффициент усиления ( $G = p_f/p_0$ ), а также длина и диаметр фокальной области по полувысоте (соответственно  $\Delta z$  и  $\Delta r$ ) приведены в таблице.

Экспериментальные результаты показывают, что при переходе от колоколообразного распределения начального

	$E$ , Дж	$p_0$ , МПа	$p_f$ , МПа	$G$	$\Delta z$ , мм	$\Delta r$ , мм	$p'_0$ , МПа	$p''_0$ , МПа
1	0.14	0.17	3.19	18	10	1.6	0.5	1.2
	1.7	1.57	17.6	11	18	2.2		
2	0.14	0.1	2.78	28	5	1.0	0.2	0.5
	1.7	0.68	19.7	29	9	1.3		

давления к кольцевому коэффициент усиления существенно возрастает, а размеры фокальной области уменьшаются.

Кроме того, для случая колоколообразного профиля начальной амплитуды коэффициент усиления значительно снижается при увеличении  $p$ , тогда как для случая кольцевого профиля он остается практически неизменным, хотя увеличение размеров фокальной области с ростом  $p$  сохраняется.

Было также обнаружено, что коэффициент усиления остается постоянным вплоть до значений начального давления  $\sim p'_0$ , возрастая на 10% при его повышении до уровня

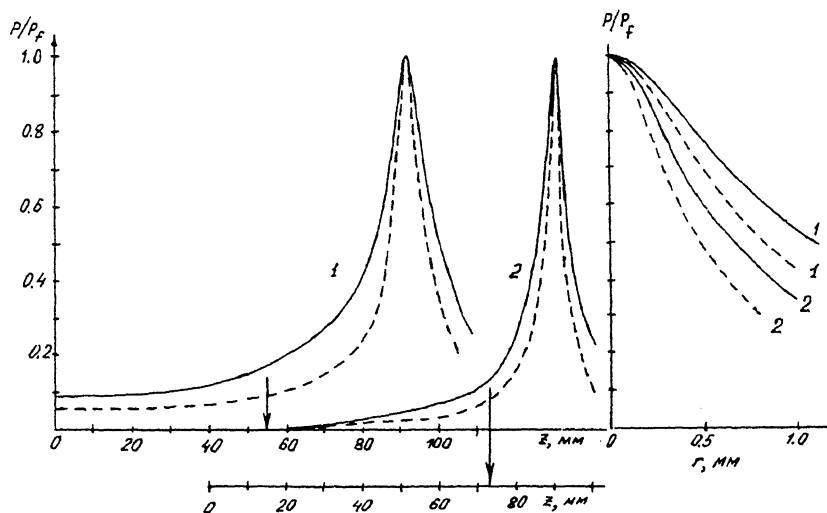


Рис. 2. а — аксиальное распределение давления для случая колоколообразного (1) и кольцевого (2) профилей начальной амплитуды ( $z$  — осевая координата): штриховая линия —  $E = 0.14$  Дж, сплошная линия —  $E = 1.7$  Дж; б — радиальное распределение давления в фокальной плоскости для случая колоколообразного (1) и кольцевого (2) профилей начальной амплитуды: штриховая линия —  $E = 0.14$  Дж; сплошная линия —  $E = 1.7$  Дж.

$\sim p_0''$  (значения  $p_0'$  и  $p_0''$  см. в таблице). Дальнейшее увеличение начального давления приводит к уменьшению коэффициента усиления.

Следует отметить, что диаметр фокальной области оказался сравним с размером чувствительной площадки датчика, что, естественно, завышало размеры фокальной перетяжки, одновременно занижая значение давления в фокусе (не менее чем в 1.5–2 раза для случая кольцевого начального распределения).

Полученные результаты позволяют сделать ряд выводов. Во-первых, отрицательное влияние, которое нелинейные эффекты оказывают на фокусировку субмикросекундных импульсов при высоких начальных давлениях, может быть существенно снижено за счет выбора радиального профиля начальной амплитуды акустических импульсов. Во-вторых, подтверждается, что в области небольших начальных давлений нелинейные эффекты могут увеличивать степень концентрации акустической энергии [4,5].

Таким образом, проведенные исследования определили пути повышения эффективности фокусировки субмикросекундных импульсов и впервые продемонстрировали возможность получения высоких давлений ( $> 20$  МПа) в малой пространственной области ( $\sim 1 \times 10$  мм) при использовании лазерного оптико-акустического концентратора. Это позволяет говорить о перспективности применения концентраторов на основе оптико-акустического эффекта в ряде прикладных задач и, в частности, для целей экстракорпоральной литотрипсии [3].

#### Список литературы

- [1] Сапожников О.А. // Акуст. журн. 1991. Т. 37. В. 4. С. 760–769.
- [2] Гусев В.Э., Карабутов А.А. Лазерная оптоакустика. М.: Наука, 1991. 304 с.
- [3] Reichenberger H. // Proc. IEEE. 1988. V. 76. N 9. P. 1236–1246.
- [4] Божков А.И., Бункин Ф.В. и др. // Изв. АН СССР. Сер. физ. 1982. Т. 46. № 8. С. 1624–1631.
- [5] Makarov S.N. Finite amplitude near-field modelling of ultrasonic fields using a transfer matrix formulation. Braunschweig, PTV-Bericht MA-42, 1995. 57 s.

Поступило в Редакцию  
2 сентября 1996 г.