

## ГЕНЕРАЦИЯ МОЩНЫХ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ИМПУЛЬСОВ ПЛОСКОЙ ИЛИ ФОКУСИРУЮЩЕЙ ВОГНУТОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ, ВЗРЫВАЕМОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ИЛИ СВЕТОВЫМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ

*Г.А. Аскарьян, М.Г. Королев, А.В. Юркин*

Описана генерация и фокусировка мощного ударного ультразвукового импульса при электрическом или световом взрыве изогнутых поверхностей (металлизованный лавсановая пленка, слой поглощающей краски и т.д.). Экспериментально получен импульс с амплитудой в тысячи атмосфер в малом пятне на расстоянии 6,5 см от излучающей поверхности. Оценки нелинейной звуковой саморефракции показали, что давления близки к предельным, но могут быть увеличены при увеличении угла фокусировки.

Приведены применения такого источника звука: исследование нелинейных свойств сред и нелинейных акустических процессов, исследование черенковского излучения звука от звука, дистанционная деструкция сред и т.д.

Генерация мощных звуковых ударных импульсов — одна из основных задач, решение которой позволит продвинуть исследование нелинейных свойств веществ, нелинейную акустику, физику изменения свойств сред (изменение структуры, фазы, упрочения, разрушения и т.л.) и др.

Известные локальные электро-<sup>1, 2</sup> и лазерно-<sup>3, 4</sup> взрывные методы генерации рожают сильную ударно-звуковую волну вблизи зоны локального энерговыделения, что не допустимо для ряда исследований, а с увеличением расстояния импульс быстро расходуется, затухает и теряет ударные свойства. Фокусировка такой расходящейся волны линзами или зеркалами слишком удаляет источник звука от объекта воздействия, что приводит не только к поглощению ударных импульсов при распространении, но и уширению пятна фокусировки, и, как следствие, ослаблению ударного воздействия.

Мы исследовали излучение звука взрывающимися поверхностями — изогнутыми, одновременно генерирующими и фокусирующими звуковой импульс кривизной поверхности<sup>5, 6</sup> или плоскими — в непосредственном контакте с линзой.

### *1. Электровзрывные поверхности, излучающие звук.*

В качестве взрывающейся поверхности использовалась металлизированная лавсановая пленка или поверхность с закрепленной насыпкой металлических опилок. Схема установки дана на рис. 1. Зарядное устройство через сопротивление  $R = 1$  МОм заряжало емкость  $C = 0,5$  мкФ до напряжения  $U = 10$  кВ. Затем ключ (1) разряжал емкость на металлизацию пленки (2), помещаемой под дном (3) стакана (5), заполненного водой. Дно было изготовлено из листа триацетата целлюлозы (основа фототехнической пленки) толщиной 0,15 мм. Вогнутость дна (3), заданная термопрессованием, совпадала с вогнутостью поддона (7), изготовленного из плексигласа. Пленка (2) зажималась между дном и поддоном, был обеспечен хороший контакт металлизации с электродами (4). Оказалось, что тонкие слои жидкости (вода, спирт, масло) в зазорах между пленкой, дном и поддоном существенно увеличивали величину импульса звука. При этом отметим важность ударного контакта, а не акустического согласования, т.к. толщины слоев гораздо меньше эффективной длины волны звука.<sup>1)</sup> Фокус зеркала находился на расстоянии 6,5 см. Фотографирование в режиме открытого затвора с плотными фильтрами показало, что энерговыделение охватывает всю поверхность зеркала.

Регистрация звука производилась датчиками из пьезокерамики, приклеенными или прижатыми к акустически согласованным латунным стержням. Были использованы два датчи-

<sup>1)</sup> Силу удара можно значительно повысить, если вместо иммерсионной жидкости использовать тонкие слои взрывающихся веществ.

ка: один (I) площадью  $2 \text{ мм}^2$ , толщиной  $1,25 \text{ мм}$  и чувствительностью  $K = 0,05 \text{ В/атм}$  и предназначенный для измерения больших давлений датчик (II) площадью  $3 \text{ мм}^2$ , толщиной  $0,5 \text{ мм}$ , чувствительностью  $K = 0,001 \text{ В/атм}$ . Чтобы избежать разрушения и отрыва датчика (II) при больших амплитудах ( $> 10^3 \text{ атм}$ ) на него надевалась накладка из латуни, прижимающая датчик к стержню. Датчик (I), градуировался квазистатически в цепи с истоковым повторителем, имеющим очень большое входное сопротивление, предотвращающее стекание заряда с датчика во время действия давления калибровки. Датчик II градуировался также по показаниям датчиков I и II при воздействии одного и того же импульса звука. Проверялась квазистатическая линейность показаний датчиков в рабочем диапазоне давлений.

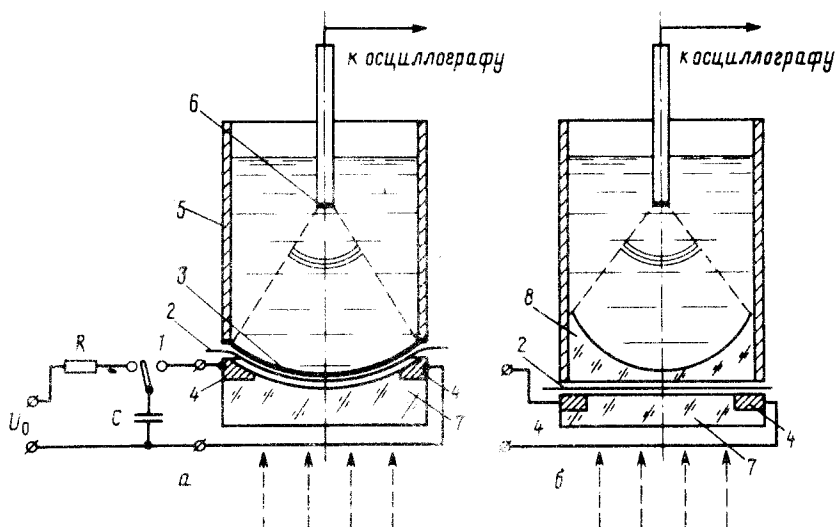


Рис. 1. Схема установки для генерации ударных импульсов электровзрывом поверхности: а – вогнутая поверхность в режиме активного зеркала; б – взрываемая плоская поверхность у линзы; 1 – замыкатель для зарядки конденсатора и разряда его на взрываемую поверхность, 2 – металлизированная лавсановая пленка (или слой металлических частиц), 3 – дно (термостампованное из листа триацетата целлюлозы), прижатое или приклеенное к сосуду 5, с водой, 4 – электроды, подводящие ток к взрываемой поверхности, 6 – калиброванный пьезодатчик, 7 – поддон, из плексигласа, 8 – акустическая линза из полистирола, фокусирующая звук в воде на расстоянии  $6,8 \text{ см}$ . Тонкие слои жидкости (вода, спирт, конденсаторное масло), между пленкой 2, дном 3 и поддоном 7, сильно повышали эффективность генерации. В случае лазерного воздействия использовалась не только металлизированная пленка, но и слой поглощающей краски между дном 3 и поддоном 7. В части экспериментов дно из тонкой титановой фольги, покрывалось снаружи слоем поглощающей краски, поверх которой вместо поддона использовались несколько лавсановых пленок, клей, гель и т.п.

На рис. 2а, б даны осциллограммы импульсов с датчика II в фокусе (б) и в случае плоской волны (а) на расстоянии, близком к фокусному для случая (б). При амплитуде плоской волны  $p_0 \approx 300 \text{ атм}$  получалось усиление в фокусе  $\approx 4$  раза, и давление достигало  $1100 \text{ атм}$ . Импульс имеет крутой фронт нарастания – меньше десятых долей мкс, длительность импульса  $2 \div 4 \text{ мкс}$  в фокусированном и  $1 \text{ мкс}$  – в плоской волне. Как мы покажем ниже, не очень большие усиления связаны с большими начальными амплитудами в плоской волне.

На рис. 3 дана кривая обмера датчиком II области фокуса, которая выявила ширину пятна на полуспаде давления  $\Delta \approx 10 \text{ мм}$  при диаметре начального пятна  $d \approx 50 \text{ мм}$  (отношение  $p_{\text{с фокус}}/p_{\text{с0}} \approx d/\Delta \approx 5$ ).

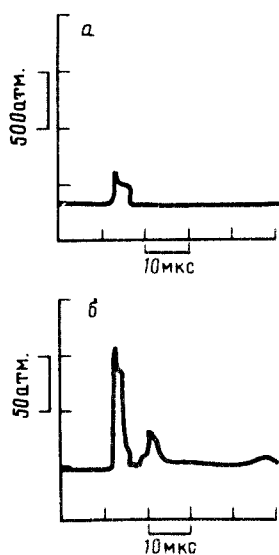


Рис.2

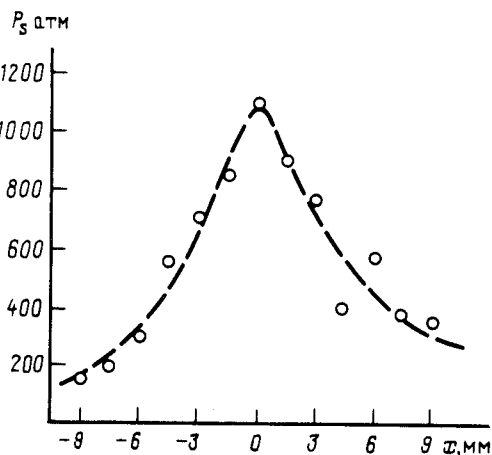
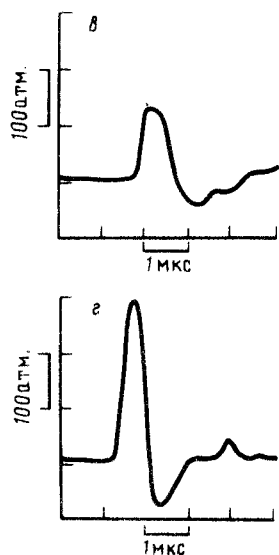


Рис.3

Рис. 2. Осциллограммы регистрации импульсов от электрического (*а* и *б*) и лазерного (*в* и *г*) взрывов металлизированной пленки. *а* - импульсы в плоской волне без фокусировки, *б* - импульсы в фокусе для электровзрыва, *в* и *г* - то же для лазерного воздействия

Рис. 3. Распределение давления в фокальной плоскости в случае электровзрыва выявило увеличение давления в фокусе в несколько раз с шириной пятна < 1 см

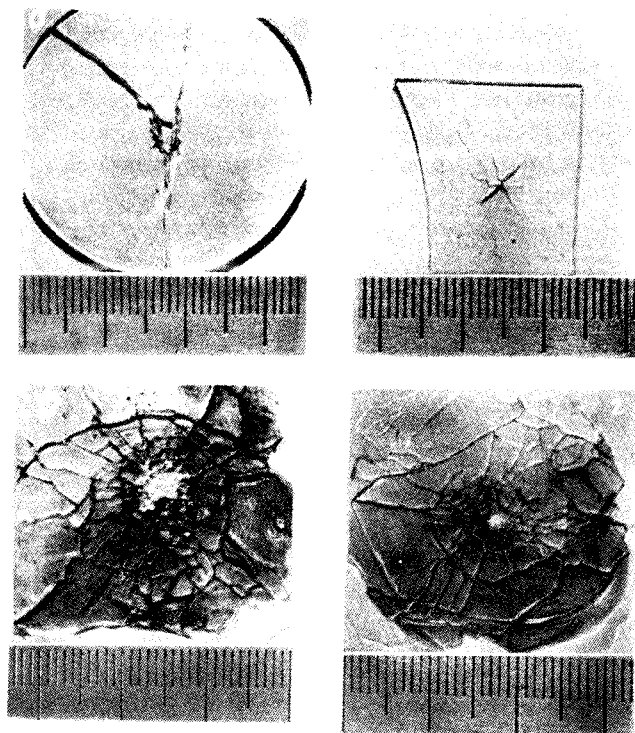


Рис. 4. Воздействие сфокусированного импульса от электровзрыва пленки на среды (пластины толщиной 1,5 мм): *а* - пробитое и треснувшее стекло; *б* - то же для плексигласа; *в* - пробит слой канифоли на подложке из кальки; *г* - то же для сравнения от импульса от лазерного взрыва. Видно, что воздействие от электровзрыва более сильное и массивное. Все - для фокусного расстояния  $F = 6,5$  см

Было исследовано разрушение различных материалов в фокусе.

На рис. 4 приведено воздействие импульса на среды -- помещаемые в фокусе пластинки толщиной 1 мм: *a* -- стекло на поверхности жидкости, *б* -- то же с пластинкой плексигласа, *в* -- пластинка канифоли (фокус в объеме жидкости). Видна достаточно высокая локальность воздействия (зона разрушения размером 3 мм). Наблюдалось разрушение камней, кусков кирпича, керамики и т.п.

Использование электровзрывных излучателей отличалось высокой эффективностью. Отметим возможность частого повторения импульсов (возможна даже зарядка несколькими металлизированными пленками с последовательными подачами взрывающих напряжений).

Были проведены оценки влияния быстрой нелинейности на фокусировку одиночных мощных импульсов.

Приближенное безаберрационное уравнение для эффективного радиуса звукового луча получается из уравнения рефракции  $\theta'_z = -\frac{1}{n} n'_r \approx \frac{1}{n} \frac{\Delta n}{a}$ , где *n* -- аналог показателя преломления  $n = c_{s0}/c_s$ . Для быстрой нелинейности скорость звука  $c_s = c_{s0} + \epsilon u$ , где  $\epsilon$  -- параметр нелинейности ( $\epsilon = \frac{1}{2}(\Gamma + 1)$ , где  $\Gamma$  -- постоянная адиабаты: для воды  $\Gamma \approx 7-8$ ) и  $u \approx p/\rho c_s$  -- скорость среды в волне, получим  $n = 1/(1 + Ap)$  и  $\Delta n = n - 1 = Ap/(1 + Ap)$ : поэтому  $\frac{1}{n} \frac{\Delta n}{a} \approx Ap/a$ , где  $A = \epsilon/\rho c_s^2$ . при этом уравнение нелинейной рефракции примет вид  $a''_{zz} = \frac{Ap}{a} \approx \frac{Ap_0 a_0}{a^2}$ , т.к.  $p = p_0 a_0/a$ , а  $\theta = a'_z$ . Умножая обе части на  $a'_z$  и интегрируя, получим связь  $\theta_0^2 - \theta^2 = 2Ap_0 a_0 (\frac{1}{a} - \frac{1}{a_0})$ . В фокусной перетяжке  $\theta = 0$ , поэтому  $\theta_0^2 = 2A(p_f - p_0)$ , т.е. амплитуда в фокусе сильно зависит от угла фокусировки  $\theta_0 \approx a/F$ . Зная  $p_f$ , можем оценить и размеры фокальной перетяжки  $a_f \approx a_0 p_0/p_f$ . Эти соотношения не учитывают ни поглощения, ни дифракции звука, поскольку ими можно пренебречь в интересующем нас диапазоне условий.

В нашем случае  $\theta_0 \approx 0,3$ ,  $A \approx 2 \cdot 10^{-10}$  абс, таким образом  $p_f - p_0 \approx 0,3 \cdot 10^3$  атм. или  $p_f \approx 0,5 \cdot 10^3$  атм в достаточно хорошем согласии с опытом. Учет дифракции дает  $\theta_0^2 \approx 2A(p_f - p_0) + \frac{\lambda^2}{4a_0^2} (\frac{p_f^2}{p_0^2} - 1)$ , где  $\lambda$  -- эффективная длина волны импульса  $\lambda \approx 0,1$  см.

## 2. Световзрывные поверхности, излучающие звук.

Была предпринята попытка использования лазерного воздействия для взрыва металлизированных и поглощающих пленок с целью генерации мощных звуковых импульсов. В отличие от предыдущих работ [7,8], где осуществлялся лазерный нагрев поглощающей жидкости у изогнутой поверхности, мы создали излучатель в виде накладки, допускающей многоцелевые варианты.

На рис. 1 дана схема, на которой пунктирными стрелками показано лазерное нефокусированное излучение. Общими в первой лазерной серии экспериментов были: плексигласовый поддон (7) и дно сосуда (3), изготовленного из тонкого выпрессованного вогнутого слоя на целлюлозной триацетатной основе.

Между ними помещалась металлизированная лавсановая пленка или слой гуаши (туши), нанесенной кистью или налитой и сдавленной прижимом поддона.

Во второй серии лазерных экспериментов вместо дна (3) использовалась штампованная сферой титановая фольга, покрытая снаружи слоем гуаши или нитрокраски, а вместо поддона (7) -- прозрачные слои, увеличивающие отдачу: несколько слоев неметаллизированной лавсановой пленки, слой клея, вязкой среды (геля, желе), нанесенные на дно поверх поглотителя (в этой серии экспериментов принимал участие Л.Д.Клебанов).

Насадки с покрытием гуашью и краской оказались удобней, чем с пленкой, т.к. выдерживали много импульсов.

В качестве лазерного воздействия использовались нефокусированные гигантские импульсы неодимового лазера на базе ГОС-1001 с модуляцией добротности самопроектирующимся затвором на LiF. Энергия каждого импульса была порядка 10 Дж, длительность 40-50 нс. Бы-

ли зарегистрированы импульсы звука с амплитудой 300–500 атм. в фокусе размером 1–2 мм при фокусном расстоянии 3,4 см. Наблюдалась локализованная разрушения пластин канифоля, датчиков из керамики и т.п. Были испробованы фокусные расстояния 6,5 и 3 см.

На малых фокусных расстояниях следы разрушений были более локализованы.

Отметим, что лазерный вариант требует гораздо большей питающей батареи и энергии ввиду малого КПД лазера в режиме модуляции добротности ( $< 10^{-3}$ ).

Измеренные в фокусе давления близки к предельным для наших углов схождения. Хотя увеличение угла схождения позволяет усилить давления в фокусе, однако теряется главное — дистанционность сильного воздействия. Выбор фокусной длины  $F \approx 6,5$  см именно обусловлен практически интересными случаями применения данного способа <sup>10</sup>.

Какие физические исследования можно осуществить, используя такие мощные импульсы?

Прежде всего исследование мгновенных нелинейностей, связанных с рывком среды в звуковом импульсе (даже одиночном!), что существенно отличается от нелинейностей, связанных с накоплением нагрева при линейном или нелинейном поглощении длительного суга. Эта область быстрой нелинейности малоисследована. Из эволюции импульса можно получить эффективные показатели адиабаты жидкости и ее значения для разных диапазонов давлений.

Существенны также уникальные исследования по поведению компактных одиночных сверхмощных импульсов в жидкостях и возможность наблюдения черенковских волн от них (напомним, что их скорость распространения превышает скорость звука в среде).

Широкие возможности использования таких мощных импульсов для стерильного иницирования реакций, дистанционного воздействия на структурообразование или наоборот деструкцию сред <sup>10</sup> и т.п.

Широкое применение такие импульсы могут получить в биологии, в медицине — от средства маломасштабного дистанционного воздействия до дробления инородных тел <sup>10</sup>.

#### Литература

1. *Наугольных К.А., Рой Н.А.* Электрические разряды в воде. М.: Наука. 1971.
2. *Юткин Л.А.* Электрогидравлический эффект. М.: Машгиз. 1955.
3. *Аскарьян Г.А. и др.* ЖЭТФ, 1963, **44**, 2180.
4. *Bell C.E., Landt J.A.* Appl. Phys. Lett., 1967, **10**, 46.
5. *Аскарьян Г.А.* ЖТФ, 1959, **29**, 277.
6. *Божков А.И., Бункин Ф.В.* Акуст. журнал, 1978, **24**, 982.
7. *Галстян А.М. и др.* Акуст. журнал, 1979, **25**, 926.
8. *Аскарьян Г.А., Клебанов Л.Д.* КЭ, 1988, **15**, 2167.
9. *Зарембо Л.К., Красильников В.А.* Введение в нелинейную акустику. М.: Наука, 1966.
10. *Principles of Extracorporeal Shock Wave Lithotripsy.* Ed. R.A.Riehle Jr. 1987, Churchill Livingstone, N.Y., Edinburgh, London.

Институт общей физики  
Академии наук СССР

Поступила в редакцию  
4 мая 1990 г.