

ОБРАЗОВАНИЕ КУМУЛЯТИВНОЙ КВАЗИСФЕРИЧЕСКОЙ СХОДЯЩЕЙСЯ УДАРНОЙ ВОЛНЫ ПРИ ОТРАЖЕНИИ КОЛЬЦЕВОЙ УДАРНОЙ ВОЛНЫ ОТ ТВЕРДОЙ ПОВЕРХНОСТИ

*Э.М.Бархударов, М.О.Мдивнишвили, И.В.Соколов,
М.И.Тактакишвили, В.Е.Терехин*

Экспериментально обнаружен новый вид кумуляции - образование квазисферической сходящейся ударной волны (КСУВ) при отражении кольцевой ударной волны от твердой поверхности. Трансформация кольцевой ударной волны в КСУВ приводит к усилению локальных кумулятивных свойств.

Исследование сходящихся ударных волн является предметом многочисленных публикаций. Наиболее интересен тот факт, что при схождении осесимметричных ударных волн (например, сферически- и цилиндрически симметричных ¹⁻³, кольцевых ⁴⁻⁶, конических ⁷) приближение фронта волны к оси (центру) симметрии сопровождается ростом интенсивности ударной волны (кумуляцией).

В настоящей работе экспериментально обнаружен новый вид кумуляции - образование квазисферической сходящейся волны (КСУВ), при отражении кольцевой (тороидальной) ударной волны от твердой поверхности. Наблюдаемая впервые трансформация кольцевой ударной волны в КСУВ приводит к усилению локальных кумулятивных свойств.

Известно, что сферическая сходящаяся волна характеризуется наиболее сильным законом кумуляции, но неустойчива относительно возмущений ее формы ^{8,9}, в то время как кольцевая волна в эксперименте достаточно устойчива ¹⁰. В связи с этим реализация КСУВ с сильным концентрированием энергии в геометрии, весьма далекой от сферической, представляется новым и важным результатом.

Схема эксперимента дана на рис.1а. Ударная волна генерируется в воздухе атмосферного давления с помощью кольцевого газоразрядного источника. Большой радиус плазменного тороида, где происходит выделение энергии разряда, равен $R_k = 5$ см. Энерговклад $E \leq 1,3$ кДж. Кольцевая ударная волна вблизи оси имеет число Маха $M \sim 2 \div 3$. На расстоянии $l = 1,5 \div 5,5$ см от плоскости кольца находится стенка (плексиглас). Фронт ударной волны визуализируется теневым методом.

Схождение фронта к оси симметрии сопровождается ростом его скорости (кумуляцией) ^{5,6}. Такое ускорение фронта приводит к изменению локальных значений угла его наклона к оси, так что отражение фронта от оси происходит нерегулярным образом, с возникновением маховской ударной волны, распространяющейся вдоль оси ¹¹ (рис.1а). Кроме того отражение кольцевой ударной волны от стенки при определенных углах падения тоже происходит нерегулярным образом ^{1,2}. Возникающая при этом отражении маховская ударная волна сходится к оси симметрии (рис.1а).

Картина последующего взаимодействия ударных фронтов определяется соотношением между радиусом R_k и расстоянием l и наиболее интересна в случае, когда $l \approx 0,7R_k \approx 3,5$ см. Тенеграмма фронтов, соответствующая моменту времени $\tau = 84$ мкс, приведена на рис.1б. Видно, что вблизи точки пересечения оси симметрии со стенкой (точка 0) формируется сходящаяся конфигурация ударных фронтов, в которой 1 - остаток кольцевого фронта, 2 и 3 - фронты маховских ударных волн, возникших при отражении кольцевого фронта от оси симметрии и от стенки соответственно. Замкнутая конфигурация фронтов, которую мы и называем КСУВ, сходится в точке 0.

Подчеркнем, что в эксперименте при $l \neq 3,5$ см КСУВ не образуется.

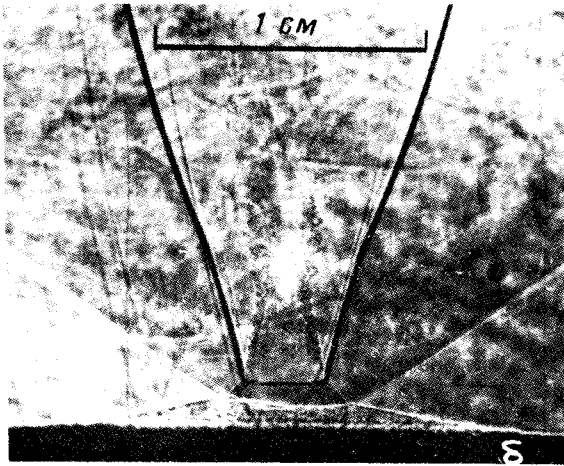
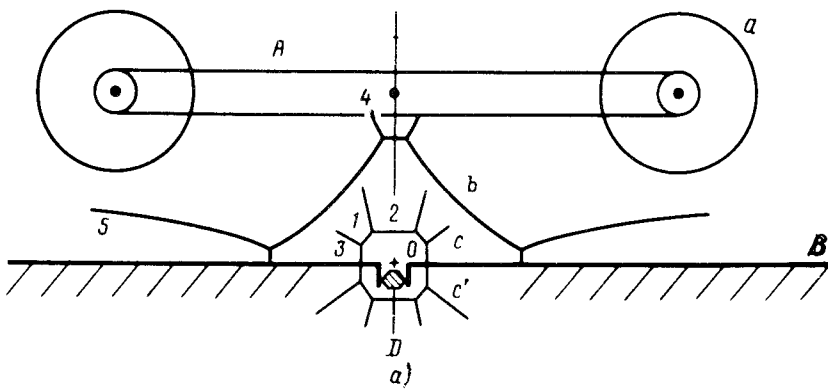


Рис. 1. *a)* - *A* - источник кольцевой ударной волны, *B* - твердая стенка, *D* - пластилиновый шарик, *a* - фронт кольцевой (тороидальной) УВ в начальный момент времени, *b, c* - сходящаяся замкнутая конфигурация ударных волн в последовательные моменты времени, *c'* - симметричное отображение конфигурации *c*. 1 - участок фронта падающей кольцевой ударной волны (КУВ), 2, 3 - маховские УВ, возникающие при отражении КУВ от оси симметрии и от поверхности *B*, соответственно, 4, 5 - отраженная от оси симметрии и от стенки кольцевая УВ, соответственно

б)- тенеграмма фронтов, $l \approx 0,7R_k$

При схождении КСУВ к точке *O* должны проявляться известные свойства кумуляции многоугольных сходящихся фронтов^{3,12-14}. Например, если фронт имеет форму правильной многоугольной призмы, то в его углах возникают маховские ударные волны. Рост этих волн приводит к образованию фронта, имеющего форму многоугольной призмы меньшей площади и более высокую амплитуду, чем исходная волна³. Такой же процесс должен иметь место и в геометрии КСУВ, поскольку наблюдаемые углы между фронтами больше критических углов перехода к нерегулярному отражению ($\sim 80^\circ$).

Оценку усиления ударной волны с уменьшающейся площадью фронта *S* получим из приближенной теории Честера - Чизнелла - Уизема²:

$$M \sim S^{-0,2}, \quad (1)$$

при $M \gg 1$. В случае цилиндрической волны $M \sim r^{-0,2}$, для сферической волны $M \sim R^{-0,4}$, где *r* и *R* - соответствующие радиальные координаты.

Если предположить, что маховское взаимодействие частей фронта КСУВ приводит к последовательному воспроизведению формы фронта с уменьшением масштаба D , то $S \sim D^2$. При этом из (1) следует, что $M \sim D^{-0,4}$, как и для сферической ударной волны.

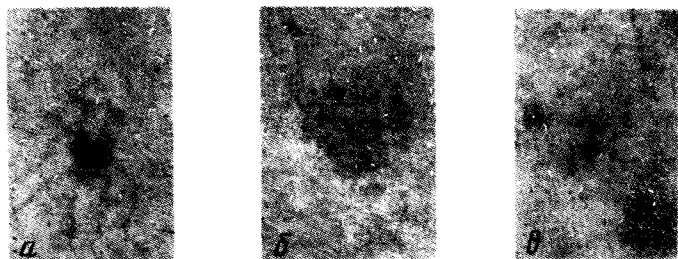


Рис. 2

В эксперименте зафиксирован локальный ожог, вызванный КСУВ. На рис. 2а приведена фотография, переснятая с термобумаги, которая закреплялась на плексигласовой стенке и подвергалась однократному воздействию КСУВ. Для сравнения на рис. 2б, в приведены аналогичные фотографии, полученные при значениях $l = 4,5$ см (в четырех выстрелах) и $l = 2,5$ см (в трех выстрелах) соответственно, когда КСУВ не формируется. Видно, что однократное тепловое воздействие КСУВ превышает трех-четырёхкратное воздействие при $l \neq 3,5$ см.

Давление P оценивалось двумя способами. Измеренная по тенеграмме скорость фронта 2 (рис. 1а) вблизи точки 0 составляет $M \approx 3,8$. Давление после отражения КСУВ должно возрастать, как минимум, как при отражении плоской волны от стенки. Используя таблицы¹⁵, получаем оценку снизу $P \approx 100$ атм.

Для регистрации давления и силового воздействия КСУВ измерялась скорость U пластилинового шарика, который выстреливался под действием КСУВ из отверстия в плексигласовой стенке (рис. 1а).

Шарик выстреливался горизонтально с высоты $H = 25$ см. Наименьшее значение дальности полета в эксперименте: $L_m \approx 2$ м. Масса шарика $m = 0,13$ г, диаметр $d \approx 5$ мм. Среднее по миделю $\pi d^2/4$ давление P сообщает шарiku импульс mU за время $\tau \sim d/c$, где $c \sim 10^3$ м/с - скорость звука за отраженной ударной волной. Отсюда:

$$U > L_m \sqrt{g/2H} \approx 10 \text{ м/с}, \quad P \approx 4mUc/\pi d^3 \approx 100 \text{ атм.} \quad (2)$$

Таким образом, при отражении кольцевой ударной волны от стенки в области малых масштабов возникает новый тип кумулятивного течения, которое сопровождается концентрированием энергии и силового воздействия, что может найти применение в физике и технологии высоких давлений.

Благодарим Г.А.Аскарьяна, И.А.Коссого и М. Vaselli за полезные обсуждения.

Литература

1. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Гидродинамика. М.: Наука, 1986.
2. Уизем Дж. Линейные и нелинейные волны. М.: Мир, 1977.
3. Забабахин Е.И., Забабахин И.Е. Явления неограниченной кумуляции. М.: Наука, 1988.
4. Бережецкая Н.К. и др. ЖЭТФ, 1984, 87, 1726.
5. Соколов И.В. ЖЭТФ, 1986, 91, 1331.
6. Косый И.А. и др. Кр. сообщ. по физике, 1987, N 11, 3.

7. Соколов И.В. ТВТ, 1988, 26, 560.
8. Забабахин Е.И. Письма в ЖЭТФ, 1979,30, 97.
9. Брушлинский К.В. Препринт ИПМ им. М.В.Келдыша N 81, М.: 1980.
10. Бархударов Э.М. и др. Изв. АН СССР, сер. МЖГ,1988,2, 176.
11. Соколов И.В. Изв. АН СССР, сер. МЖГ,1989,4, 148.
12. Белоконь В.А. и др. ЖЭТФ, 1965,48, 50.
13. Баронец П.Н. Изв. АН СССР, сер. МЖГ,1984,3, 182.
14. Schwendeman D.W., Whitham G.B. Proc. Roy. Soc. Lond. A, 1987, 413, 297.
15. Баженова Т.В., Гвоздева Л.Г. Нестационарные взаимодействия ударных волн. М.: Наука, 1977.

Институт общей физики
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
3 августа 1990 г.