

## КУМУЛЯЦИЯ УДАРНЫХ ВОЛН, ВОЗБУЖДАЕМЫХ ОСЕСИММЕТРИЧНЫМ СКОЛЬЗЯЩИМ РАЗРЯДОМ

И.А. Коссий, К.В. Краснобаев, И.В. Соколов, В.Е. Терехин

*Измерено радиальное изменение скорости фронта кольцевой ударной волны. Подтвержден факт кумулятивного схождения. Приведены результаты решаемой на ЭВМ неавтономной газодинамической задачи, сравниваемые с данными эксперимента и выводами приближенной теории.*

В работе /1/ описана кольцевая система поверхностных разрядов, возникающих в результате одновременного срабатывания большого числа искровых промежутков. Подобные устройства можно использовать для возбуждения ударных волн (УВ) специальной, наперед заданной конфигурации, в частности, кольцевых, эллиптических и т.д. Исследование существенно неоднородных сходящихся УВ с фронтами замкнутых конфигураций представляет интерес как для фундаментальных проблем газодинамики, так и для техники эксперимента — в качестве способа создания высоких избыточных давлений, температуры и плотности газа при относительно малом энергозатрате.

Для сходящихся сферических и цилиндрических УВ теория предсказывает бесконечное возрастание давления при стремлении радиуса УВ к нулю (кумулятивный эффект) /2/. При энерговыделении, сосредоточенном в кольцевой области, которая имеет форму тонкого кругового кольца, проявление кумулятивного эффекта неочевидно, так как возможно вытекание газа из области повышенного давления в осевом направлении. Тем не менее, и в этом случае экспериментальные данные /1/ и теоретические результаты /3/ указывают на кумулятивный характер нарастания амплитуды волны вблизи центра кольца.

Цель настоящей работы — дальнейшее изучение кольцевых ударных волн (КУВ). По измерению скорости КУВ определяется закономерность роста ее интенсивности вблизи оси. Сопоставляются данные эксперимента, специально поставленного численного расчета и приближенной теории.

Как и /1/, для экспериментальной реализации КУВ создавался одновременный пробой большого числа искровых промежутков, расположенных на поверхности кольца диаметром  $2r_0 = 10$  см и толщиной  $2h = 1$  см. Энергозатраты в кольцевой разряд  $E \lesssim 100$  Дж. Эксперимент проводился в воздухе при давлении  $75 \text{ торр} < p_0 < 750 \text{ торр}$ .

Фронт УВ регистрировался при помощи рефракционного датчика (рис. 1). Диафрагмой  $D_1$  луч гелий-неонового лазера разбивался на два параллельных луча диаметром 0,7 мм, отстоящих друг от друга на 2 мм. Зеркалом  $Z_1$  оба луча направлялись во внутрикольцевую область, а затем линзой  $L$  (диаметр 150 мм) фокусировались в отверстие диафрагмы  $D_2$ , за которой установлен ФЭУ-60. Рефракция лучей света на фронте УВ приводила к их последовательному уходу из отверстия диафрагмы  $D_2$  и ослаблению сигнала с ФЭУ. По известному расстоянию между лучами в плоскости кольца 2,5 мм и измеряемому временному интервалу между импульсами определялась скорость УВ.

На рис. 2 приведены экспериментальные зависимости скорости КУВ от расстояния до оси симметрии  $r$  при различных начальных давлениях газа  $p_0$ . Полученные кривые в интервале  $2 \text{ мм} < r < 10 \text{ мм}$  аппроксимируются зависимостью

$$v \propto r^{-(0,25 \pm 0,3)}$$

(по теории /3/, для сильной УВ  $v \propto r^{-0,2}$  при  $r \rightarrow 0$ ). Вплоть до расстояний  $\sim 2$  мм, являющихся пределом пространственного разрешения, продолжается монотонное возрастание скорости УВ.

С целью теоретического исследования газодинамических явлений применительно к условиям эксперимента проведено численное моделирование.

Решалась задача для уравнений бездиссипативной гидродинамики совершенного газа с показателем адиабаты  $\gamma = 7/5$  в цилиндрической системе координат  $r, z$ . Предполагалось, что до момента  $t = 0$  покоящийся газ в безграничной области пространства имеет параметры, близкие к атмосферным. В момент вре-

мени  $t = 0$  в кольцевой области  $|z| < h, r_0 - h < r < r_0 + h$  задавалось приращение температуры  $\Delta T$ , эквивалентное мгновенному выделению в этой области энергии  $E = 100$  Дж\*.

Возникающее течение анализировалось на ЭВМ методом сквозного счета по схемам Лакса – Вендроффа и Мак-Кормака. Граница расчетной области выбиралась так, чтобы газодинамические возмущения в процессе счета не достигали ее. На оси  $r = 0$  задавались обычные условия симметрии. Характер течения соответствовал общим представлениям о прогреве газа за счет внешнего источника тепла [5,6].

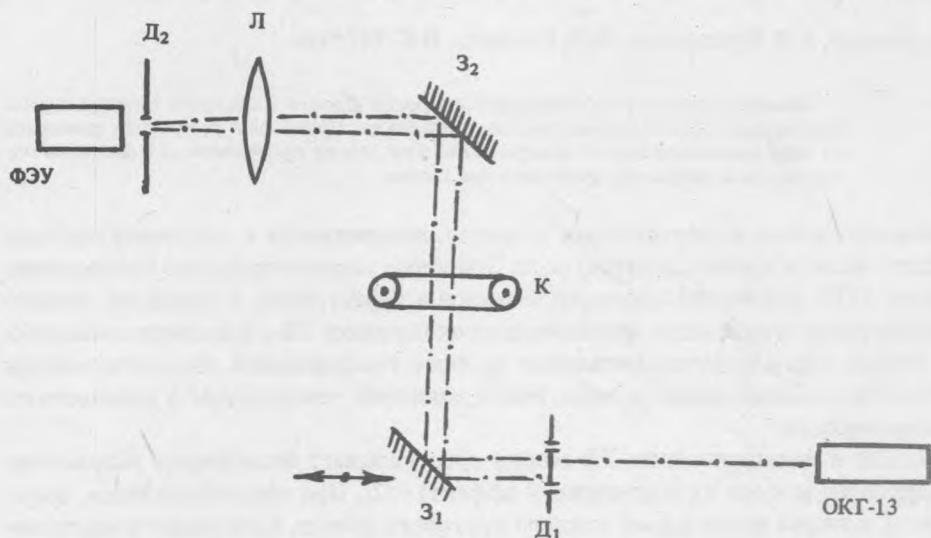


Рис. 1. Схема эксперимента.

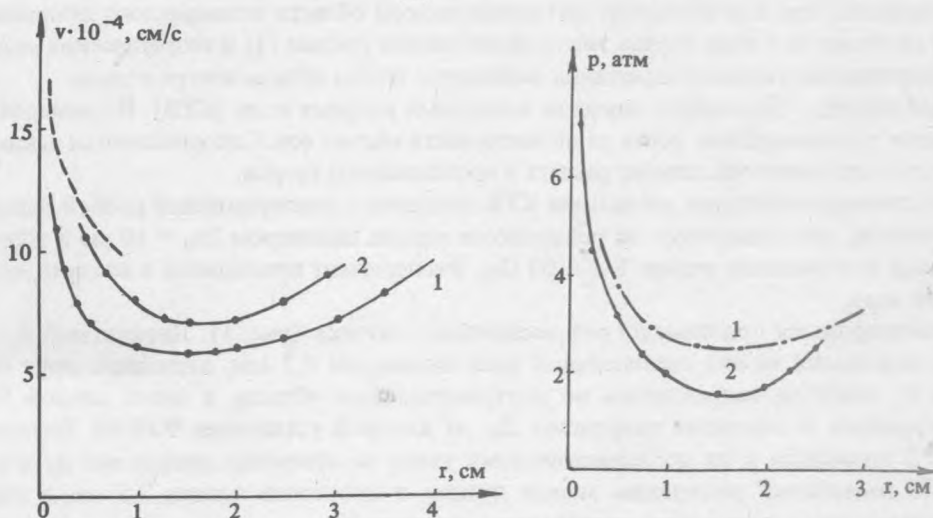


Рис. 2. Экспериментальные и теоретическая зависимости скорости КУВ от расстояния до оси симметрии: сплошная линия – эксперимент,  $p_0 = 200$  (1), 75 (2) торр; пунктир – асимптотический закон роста скорости КУВ,  $p_0 = 200$  торр.

Рис. 3. Экспериментальная и теоретическая зависимости давления на фронте КУВ от расстояния до оси симметрии,  $p_0 = 300$  торр: 1 – численный расчет (область энерговыделения  $0,75 \times 0,75$  см); 2 – эксперимент.

На рис. 3 приведена полученная из численного расчета зависимость ближайшего к оси  $r = 0$  максимума давления от  $r$  в плоскости  $z = 0$ . Для сравнения такая же зависимость построена на основании данных эксперимента с использованием соотношения Гюгоньо для скачка давления на фронте ударной волны. Качественное согласие результатов подтверждает, что возрастание амплитуды волны, наблюдаемое экспериментально, есть следствие чисто гидродинамического эффекта кумуляции осесимметричных УВ.

\* Близкая по постановке задача решалась в [4].

Выведем асимптотический закон роста амплитуды УВ при  $r \rightarrow 0$ . В [3] он был найден с точностью до безразмерной константы  $C$ . Повторив численный расчет при пониженном начальном давлении  $p_0$  (тогда параметры течения не зависят от  $p_0$ ), можно найти скорость волны в области малых  $r$  ( $< 0,1r_0$ ) и определить  $C$ :

$$v \cong 0,5 (r_0/r)^{0,2} (E/\rho_0 r_0^3)^{1/2}. \quad (1)$$

Для сравнения с экспериментом на рис. 2 пунктиром показана кривая, отвечающая зависимости (1), при  $p_0 = 200$  торр и энергии  $E$ , вкладываемой в разряд,  $\sim 80$  Дж.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Бережецкая Н. К. и др. ЖЭТФ, 87, вып. 6(12), 1926 (1984).
2. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Гидродинамика. М., Наука, 1986.
3. Соколов И. В. ЖЭТФ, 91, вып. 4(10), 1331 (1986).
4. Худяков В. М. ДАН СССР, 287, № 4, 802 (1986).
5. Краснобаев К. В., Сюняев Р. А. МЖГ, № 4, 106 (1983).
6. Краснобаев К. В. МЖГ, № 4, 133 (1984).

Институт общей физики АН СССР

Поступила в редакцию 1 июня 1987 г.