

9. Васильева Н. Л., Седова Г. Л., Филиппов А. В., Черный Л. Т. Электродинамические течения слабоионизованных аэрозолей с учетом зарядки частиц дисперсной фазы // VI Всесоюз. съезд по теор. и прикл. механике: Аннотации докл. — Ташкент, 1986.

Поступила 27/III 1987 г.

УДК 533.6 011

ИССЛЕДОВАНИЕ УДАРНОЙ ВОЛНЫ В ТРУБЕ ПРИ СФЕРИЧЕСКОМ ВЗРЫВЕ

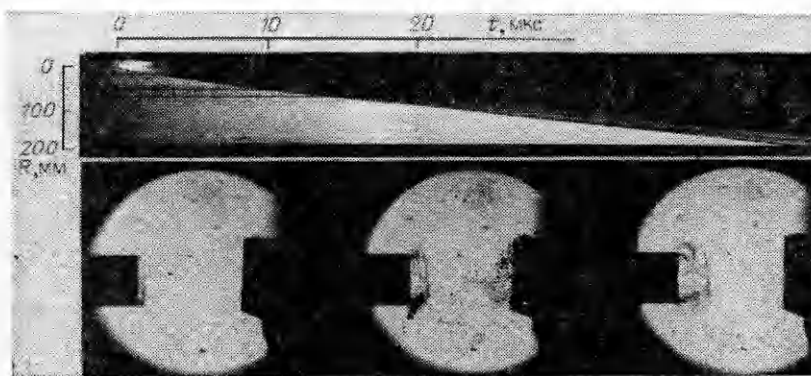
Э. К. Андержанов, Б. Д. Христофоров
(Москва)

В [1] получены эмпирические зависимости параметров ударных волн (УВ) в трубах при взрыве сосредоточенных зарядов ВВ в воздухе, справедливые на больших расстояниях от центра взрыва, где поршневым действием его продуктов можно пренебречь, а сферическая УВ трансформируется в плоскую. Ниже приведены результаты экспериментального исследования ближней зоны взрыва. Численное решение такой трехмерной нелинейной и нестационарной задачи затруднительно из-за необходимости учета сложной картины взаимодействия прямой и отраженных от стенок УВ, возникающих при этом гидродинамических неустойчивостей у оси трубы, а также реальных свойств среды, состоящей из воздуха, перемешанного с продуктами взрыва из-за неустойчивости Рэлея — Тейлора.

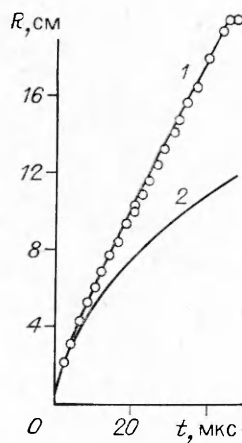
В опытах использовались толстостенные металлические трубы радиусом $r = 1,5$ и $1,9$ см, в которых взрывались сферические заряды из тэна массой $M = 0,8$ и $2,5$ г ($\rho = 1,6$ г/см³), расположенные на оси трубы. Иницирование осуществлялось в центре заряда, где размещался инициатор с малой навеской азида свинца, электрическим взрывом манганиновой проволоки толщиной $0,05$ мм, пронизывающей заряд.

Движение фронта УВ фотографировалось камерой СФР-2М, сопряженной с теневой установкой, через продольное окно в трубах в варианте фоторегистрации. Выход УВ из труб разной длины и картина гидродинамического течения регистрировались в варианте лупы времени. По этим данным построены годографы $R(t)$ фронта УВ в трубах и определены его параметры. При обработке экспериментальных результатов учитывался разброс слоя ВВ, который для используемых зарядов составил $\sim 0,2$ мм [2].

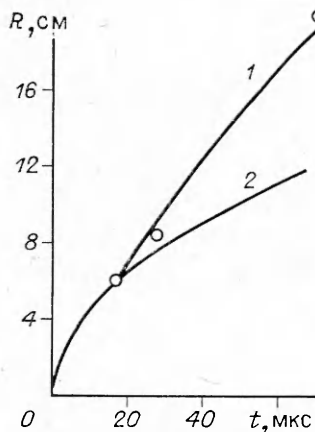
На рис. 1 приведены фотографии УВ в трубе по результатам целевой регистрации и покадровой съемки (справа на кадрах видно зеркало, с помощью которого регистрировался момент иницирования, время между кадрами 4 мкс), а на рис. 2—4 — измеренные годографы УВ для различных условий взрыва. Для выяснения условий формирования УВ в трубе и определения эмпирических зависимостей для параметров ее фрон-



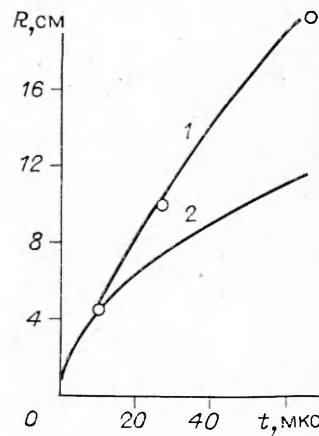
Р и с. 1



Р и с. 2



Р и с. 3



Р и с. 4

та измеренные годографы сравниваются с полученными для взрыва тэна в неограниченной атмосфере [2] и рассчитанными по ним годографами УВ в трубе в предположении, что параметры фронта являются функцией отношения энергии (или массы) ВВ к массе воздуха в УВ и не зависят от симметрии взрыва. Для седовского взрыва такое предположение выполняется точно, а для взрыва ВВ — приближенно [3].

Варьируемый параметр при пересчете данных [2] — положение границы перехода R_1 от сферической к плоской симметрии, которая может быть оценена из экспериментальных результатов (рис. 2—4) по точке отхода измеренного годографа (кружки) от годографа для сферического взрыва (кривые 2). Пересчет производился для значений R_1 , больших или равных $\sqrt{3/2} r$ (кривые 1), последнее значение соответствует равенству масс газа в сфере и цилиндре, ограниченном стенками трубы и фронтом УВ. Параметры УВ при этом не терпят разрыва в точке R_1 , а при $R_1 > \sqrt{3/2} r$ они скачком возрастают в точке перехода от сферической к плоской симметрии, что может происходить при взаимодействии фронта прямой УВ с отраженными от стенок волнами.

Сравнение экспериментальных данных и кривых 1, 2 показывает, что R_1 возрастает при снижении концентрации энергии взрыва в трубе, которую можно охарактеризовать параметром $M^{1/3}/r$. Например, для заряда $M = 2,5$ г при $r = 1,5$ см экспериментальные данные согласуются с результатами пересчета [2] с погрешностью около 3% для $R_1 = \sqrt{3/2} r$ (рис. 2), а при $M = 0,8$ г и $r = 1,9$ см — примерно с той же погрешностью для $R_1 = 3r$ (рис. 3). Экспериментальные данные можно аппроксимировать зависимостью

$$(1) \quad R_1/r = \begin{cases} 5 - 0,42M^{1/3}/r, & 4 \leq M^{1/3}/r \leq 9 \text{ (кг}^{1/3}\text{/м)}, \\ \sqrt{3/2}, & M^{1/3}/r > 9 \text{ (кг}^{1/3}\text{/м)}. \end{cases}$$

Точность такой аппроксимации демонстрирует рис. 4, где показан годограф ($M = 0,8$ г, $r = 1,5$ см), для которого граница перехода R_1 находилась по формуле (1).

Процесс формирования сильной плоской УВ в трубе определяется взаимодействием прямой и отраженных волн. С расстоянием угол падения УВ α на стенки увеличивается и при $\alpha = \alpha_* = (1/2)\arccos((\gamma - 1)/2)$ происходит переход от регулярного режима отражения к нерегулярному с образованием трехволновой конфигурации [3]. Точка пересечения волны Маха с прямой УВ перемещается к оси трубы, что и приводит к образованию плоской УВ в трубе на расстоянии $R_* \approx 4,7 r$ (для условий эксперимента). При снижении интенсивности падающей на стенки трубы УВ R_* увеличивается [3], что согласуется с результатами измерений (рис. 2—

4). Дальнейший процесс формирования УВ связан с образованием плоских волн при столкновении отраженных на оси трубы и их взаимодействием с фронтом прямой волны («догоном»).

Параметры фронта УВ в трубе можно найти по его скорости, определяемой графическим дифференцированием годографов, и ударной адиабате воздуха [3] так, как это сделано в [2]. При этом для получения достаточной точности необходимо усреднение результатов большого количества экспериментов, что обеспечивает хорошее согласие экспериментальных данных [2] с результатами численных расчетов [4]. При ограниченном количестве экспериментальных данных, как показывает проведенный анализ, необходимую для практических приложений точность в определении параметров фронта можно получить пересчетом результатов [2], добиваясь с помощью варьирования параметра R_1 наилучшего совпадения измеренного и расчетного годографов УВ. Найденные таким образом эмпирические формулы для годографа $R(t)$ УВ, скорости ее фронта N и давления Δp для сферической и плоской симметрии следующие:

$$0,053 \leq R/M^{1/3} \leq R_1/M^{1/3} (\text{м/кг}^{1/3}), \quad R/M^{1/3} = 0,053(1 + 2,88 \times \\ \times 10^5 t/M^{1/3})^{0,64},$$

$$N = 1880(R/M^{1/3})^{-0,56}, \quad \Delta p = 3,8(R/M^{1/3})^{-1,14};$$

плоская УВ:

$$R_1/M \leq R/M \leq 0,0429/B \text{ (м/кг)},$$

$$\frac{t-t_1}{R_1} = \frac{(BR_1/M)^{0,187} \left[\left(\frac{R}{R_1} \right)^{1,187} - 1 \right]_x}{2232}, \quad \frac{t_1}{M^{1/3}} = \frac{(R_1/R_0)^{1,56} - 1}{2,88 \cdot 10^5},$$

$$N = 1880(BR/M)^{-0,187}, \quad \Delta p = 3,8(BR/M)^{-0,38};$$

$$R_2/M = 0,0429/B \leq R/M \leq 0,512/B \text{ (м/кг)},$$

$$\frac{t-t_2}{R_2} = \frac{(BR_2/M)^{0,3} \left[\left(\frac{R}{R_2} \right)^{1,3} - 1 \right]_x}{1664}, \quad \frac{t_2-t_1}{R_1} = \frac{(BR_1/M)^{0,187} \left[\left(\frac{R_2}{R_1} \right)^{1,187} - 1 \right]}{2232},$$

$$N = 1280(BR/M)^{-0,3}, \quad \Delta p = 1,78(BR/M)^{-0,6};$$

$$R_3/M = 0,512/B \leq R/M \leq 4,096/B \text{ (м/кг)},$$

$$\frac{t-t_3}{R_3} = \frac{(BR_3/M)^{0,377} \left[\left(\frac{R}{R_3} \right)^{1,377} - 1 \right]_x}{1694}, \quad \frac{t_3-t_2}{R_2} = \frac{BR_2/M^{0,3} \left[\left(\frac{R_3}{R_2} \right)^{1,3} - 1 \right]}{1664},$$

$$N = 1230(BR/M)^{-0,377}, \quad \Delta p = 1,42(BR/M)^{-0,85}.$$

Здесь R_0 — радиус заряда ВВ; $B = 1,5 r^2$; R, r в м; M в кг; Δp в МПа; t в с; N в км/с. В диапазоне $0,512 \leq BR/M$, где поршневое действие продуктов взрыва прекращается, давление на фронте УВ, определенное по приведенным формулам, согласуется с рассчитанным по формуле [1] (размерности величин те же) $\Delta p = 7,87 \cdot 10^{-7} \varepsilon/R + 3,9 \cdot 10^{-4} \sqrt{\varepsilon/R}$ ($\varepsilon = MQ/(2\pi r^2)$). Для тэна $Q = 5,9 \cdot 10^6$ Дж/кг.

ЛИТЕРАТУРА

1. Родионов В. Н., Рябинин Ю. Н., Вахрамеев Ю. С. Затухание ударных волн в каналах постоянного сечения // Физика взрыва.— М.: Изд-во АН СССР, 1956.— № 5.
2. Христофоров Б. Д. Параметры фронта ударной волны в воздухе при взрыве зарядов из тэна и азида свинца разной плотности // ПМТФ.— 1961.— № 6.
3. Баум Ф. А., Орленко Л. П., Станюкович К. П. и др. Физика взрыва.— М.: Наука, 1975.
4. Кореньков В. В., Охитин В. Н. Численная оценка влияния плотности ВВ на параметры воздушных ударных волн // ПМТФ.— 1983.— № 3.

Поступила 16/III 1987 г.