

О МЕХАНИЗМЕ ФОРМИРОВАНИЯ ГАЗОВОЙ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ СТРУИ

Ю. В. Батьков, А. Д. Ковтун, С. А. Новиков, В. И. Скоков,
Л. А. Толстикова

ВНИИ экспериментальной физики, 607190 Саров

Приведены результаты рентгенографических исследований процесса образования газовой высокоскоростной струи в плоских П-образных зарядах небольшого удлинения. Показано, что в воздушной полости в результате столкновения потоков продуктов взрыва формируется ударно-сжатая область. После окончания детонации заряда из этой области вытекает струя со скоростью, превышающей скорость детонации. Струя обладает кумулятивным эффектом, максимум которого наблюдается в случае квадратной формы воздушной полости.

В [1] описан взрывной размыкатель электрической цепи (рис. 1), в котором на поверхности взрывчатого вещества (ВВ), обращенной к разрушаемому проводнику, имеются пазы. Взрывчатое вещество и проводник располагаются на диэлектрическом основании. Максимальное быстродействие размыкателя наблюдалось в случае, когда ширина паза (d) приблизительно равна его высоте (L).

Для объяснения принципа работы размыкателя [1] и установления условий оптимизации его геометрии рассматривались два механизма формирования газовой высокоскоростной струи. Динамика развития кумулятивной струи продуктов взрыва (ПВ) в полых зарядах ВВ согласно [2–4] характеризуется наличием начального участка. Поэтому максимальная скорость струи достигается в более длинных, чем в [1], зарядах. С другой стороны, при определенных условиях [5] кумулятивная струя может формироваться почти без задержки и практически мгновенно достигает максимальной скорости.

В [6] рассматриваются две стадии образования струи. На первой стадии в плоскости столкновения газовых потоков формируется область повышенного давления и плотности. Высокоскоростная струя образуется после окончания детонации заряда ВВ за счет изотропического расширения ударно-сжатого газа. Максимальная скорость такой струи и, следовательно, кумулятивный эффект определяются степенью сжатия ПВ на первой стадии.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 00-01-00502).

Цель настоящей работы — исследование механизма формирования струи в заряде с пазами [1] и оптимизация его геометрии. При этом также ставилась задача определить плотность и скорость струи.

Основные экспериментальные исследования выполнены с использованием импульсной рентгенографической методики на двухкадровой 600-киловольтной установке ЭРИДАН-2, ($\tau_{\text{имп}} = 0,1$ мкс). Рентгеновские изображения обрабатывались с использованием компьютерных методов, что позволило дополнительно получить данные о распределении плотности ПВ в заряде.

Схема рентгенографических экспериментов приведена на рис. 2. Исследуемый заряд с воздушной полостью устанавливался на пенопластовое основание плотностью $0,1 \div 0,15$ г/см³, между ними располагалась тонкая (1 мм) индикаторная пластина из алюминия. Заряд инициировали по поверхности T с помощью генератора плоской детонационной вол-

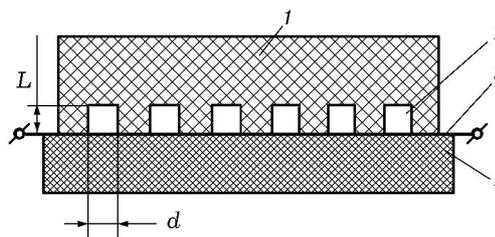


Рис. 1. Взрывной размыкатель электрической цепи:

1 — взрывчатое вещество, 2 — паз, 3 — проводник, 4 — диэлектрическое основание

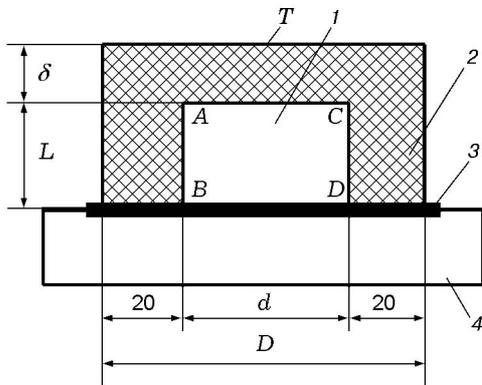


Рис. 2. Схема экспериментов:
1 — воздушная полость, 2 — заряд, 3 — индикаторная пластина из алюминия, 4 — пенопластовое основание

Таблица 1

Номер заряда	L , мм	d , мм	L/d	δ , мм
1	20	40	0,5	20
2	60	20	3	0
3	20	20	1	20
4	20	10	2	20

ны (ДВ) с разновременностью не хуже 0,2 мкс. Размеры зарядов приведены в табл. 1. Заряды изготавливались из ВВ, имеющего скорость детонации $D_{ВВ} = 7,8$ км/с при плотности $\rho_{ВВ} = 1,52$ г/см³. Все заряды вдоль направления рентгенографирования имели толщину 40 мм.

На рис. 3,а приведена рентгенограмма процесса в опытах с зарядом № 1 (см. табл. 1). Съемка сделана спустя 4,2 мкс после выхода ДВ на индикаторную пластину. Отчетливо видны угловые ударно-сжатые области, формирующиеся вдоль плоскостей столкновения потоков ПВ, движущихся с граней AB , CD и AC . На рис. 3,а за пределами исходного положения заряда видна начальная стадия формирования области ПВ двукратного сжатия, а на рис. 3,в — ее окончание. Двукратный режим столкновения ПВ наблюдался при детонации заряда в случае, когда $L > d/2$.

При формировании областей однократного и двукратного сжатия определяющую роль играет поток ПВ, идущий с грани AC . С увеличением длины заряда ($L > 2d$) его доля в общем расходе ПВ, участвующих в столкно-

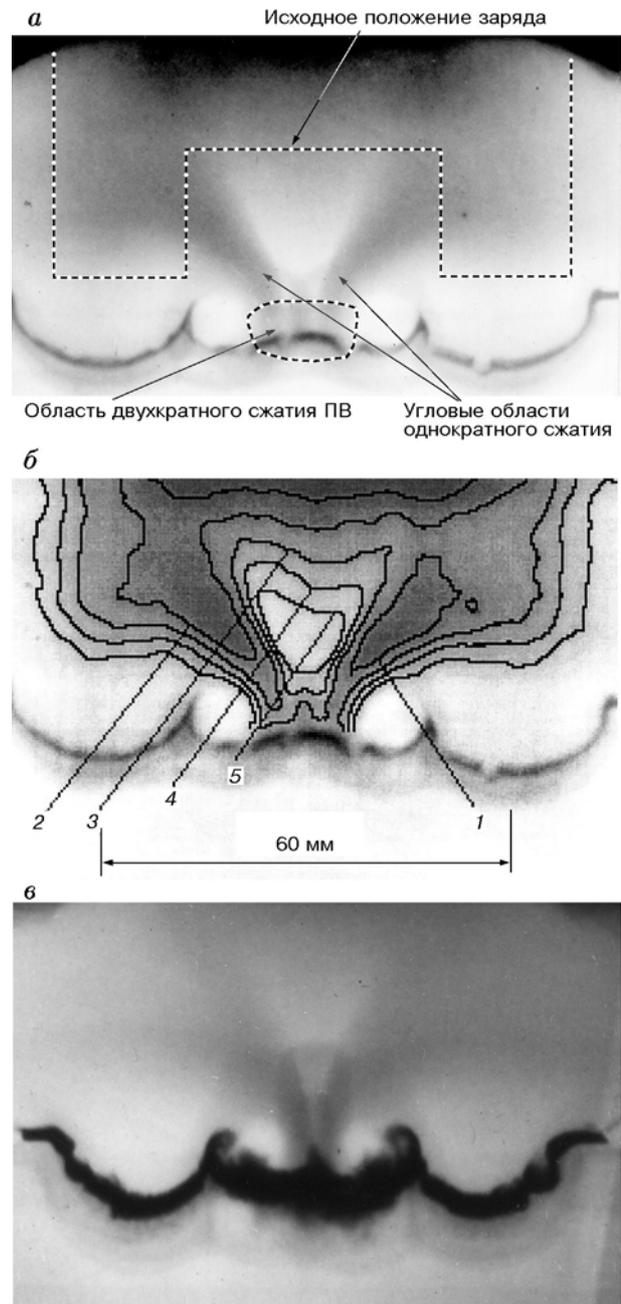


Рис. 3. Рентгенограммы процесса в опыте с зарядом № 1 в моменты времени $t = 4,2$ (а) и $5,8$ мкс (в). Поле плотностей ПВ (б) при $t = 4,2$ мкс, $\rho_{ПВ}$, г/см³: 1 — 0,36; 2 — 0,34; 3 — 0,32; 4 — 0,30; 5 — 0,28:

момент времени, соответствующий окончанию детонации заряда, принят за нуль

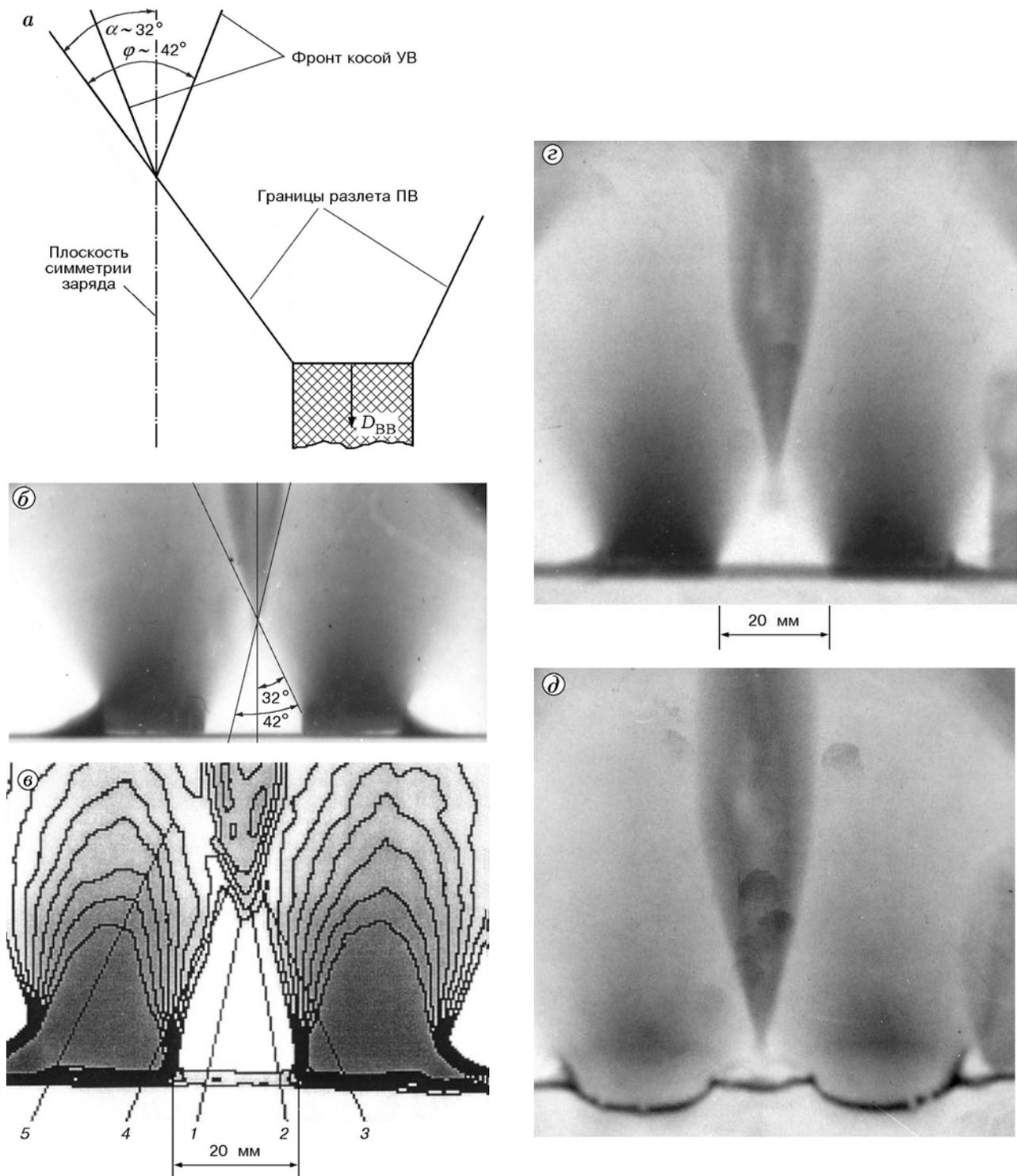


Рис. 4. Схема течения ПВ в заряде № 2 (а) (вторая половина заряда симметрична первой). Рентгенограммы процесса в опыте с зарядом № 2 в моменты времени $t = -0,66$ (б), 0,2 (в), 1,7 мкс (д). Поле плотностей ПВ в заряде (е) при $t = -0,66$ мкс, $\rho_{ПВ}$, г/см³; 1 — 0,6; 2 — 0,7; 3 — 0,8; 4 — 0,9; 5 — 1,0;

момент времени, соответствующий окончанию детонации заряда, принят за нуль

вении, уменьшается. В этом случае процесс формирования области повышенной плотности сводится к однократному сжатию ПВ, движущихся с граней AB и CD . Экспериментально такой режим столкновения наблюдается в опыте с зарядом № 2, схема течения ПВ в котором приведена на рис. 4, *a*. Момент съемки соответствует положению фронта ДВ на расстоянии 5 мм до индикаторной пластины.

Линия, соединяющая вершину области повышенной плотности с внутренней точкой на детонационном фронте, образует угол $\alpha \approx 32^\circ$, который почти совпадает с теоретическим углом (36°) разворота продуктов взрыва в волне разрежения с коэффициентом политропы $n = 3$ за фронтом ДВ. На рентгенограмме отчетливо регистрируется фронт косоугольной УВ, положение которого определяется углом $\varphi = 42^\circ$. Максимальный поперечный размер области ударно-сжатых ПВ равен $\approx 0,6d$. Перед фронтом УВ плотность ПВ вследствие ее малости регистрируется приблизительно, $\rho_1 \approx 0,05 \div 0,08 \text{ г/см}^3$. За фронтом УВ плотность возрастает почти на порядок, $\rho_2 = 0,6 \div 0,9 \text{ г/см}^3$. Таким образом, степень сжатия сильно разреженных продуктов взрыва $k = \rho_2/\rho_1 \approx 7 \div 10$, что удовлетворительно согласуется с расчетом [6], который для идеального газа при $n = 1,4$ дает максимальное значение $k = 6$.

С точки зрения механизма формирования струи отметим следующие факты. Об отсутствии истечения кумулятивной струи из области столкновения ПВ в процессе детонации заряда указывают два взаимосвязанных обстоятельства. Во-первых, это формирование присоединенного косоугольного скачка уплотнения. При наличии кумулятивной струи он должен быть отошедшим [7]. Во-вторых, как видно из рис. 4, *b, c*, индикаторная пластина находится в неизменном положении, что также указывает на отсутствие кумулятивной струи ПВ.

Моменты съемки картины течения ПВ в воздушной полости выбирались таким образом, чтобы зарегистрировать распад сгустка ПВ после окончания детонации заряда и оценить скорость формирующейся при этом газовой струи. Поэтому рентгенограммы, приведенные на рис. 4, *g, d*, получены спустя 0,2 и 1,7 мкс после окончания детонации заряда.

Картина, приведенная на рис. 4, *g*, практически не отличается от рентгенограммы процесса в опытах с зарядом № 2, полученной во время детонации заряда (см. рис. 4, *b*), за

исключением того, что вершина сгустка ПВ потеряла четкие очертания вследствие начала формирования из ее поверхности струи. Струя в данный момент времени имеет каплевидную форму с характерным размером ≈ 4 мм, и ее скорость еще не достигла максимума, так как плотность головы струи еще достаточно велика ($\approx 0,2 \text{ г/см}^3$) при плотности ударно-сжатых ПВ $\approx 0,9 \text{ г/см}^3$.

За 1,5 мкс (см. рис. 4, *d*) струя прошла расстояние в 13 мм, достигла пластины и сместила ее на ≈ 1 мм. Эти данные не позволяют точно рассчитать скорость струи, однако ее значение, несомненно, превышает скорость детонации ВВ. При этом плотность головы струи упала до $\leq 0,05 \text{ г/см}^3$.

Результаты, полученные при исследовании детонации зарядов № 1 и № 2, свидетельствуют о том, что формирование газовой высокоскоростной струи в плоских П-образных зарядах при $L/d \leq 3$ происходит по механизму [6]. С точки зрения возможного кумулятивного эффекта различных зарядов большее значение имеет скорость струи на второй стадии. Измерения абсолютных значений скорости струи в опытах с зарядами № 1, № 3 и № 4 не проводились, но делались косвенные ее оценки с использованием подхода, следующего из [6]. Максимальная скорость истечения струи u_j в воздух по окончании детонации заряда зависит от плотности ρ_2 и давления p_2 ударно-сжатых ПВ и определяется выражением

$$u_j \approx u_{\max} = \frac{2}{n-1} \sqrt{\frac{np_2}{\rho_2}} \quad [6],$$

где n — коэффициент политропы ПВ. Полагая $p = A\rho^n$ и $n = 3$, получим, что $u_j \sim \sqrt{\rho_2^{n-1}} \sim \rho_2$. Отсюда, определяя в различных зарядах плотность ПВ в областях сжатия, можно оценить относительные скорости струй, истекающих из этих областей, и прогнозировать кумулятивный эффект каждого заряда.

Плотность ПВ в зарядах ВВ определяли путем цифровой обработки полученных в эксперименте рентгеновских изображений следующим образом. В каждом эксперименте проводилось рентгенографирование не только заряда, но и «ступенчатого клина», состоящего из 3–4 участков различной толщины d ($d_{\max} = 40$ мм) и изготовленного из того же состава ВВ, что и заряд. Измеряя на рентгеновской пленке степень почернения участков изображения, соот-

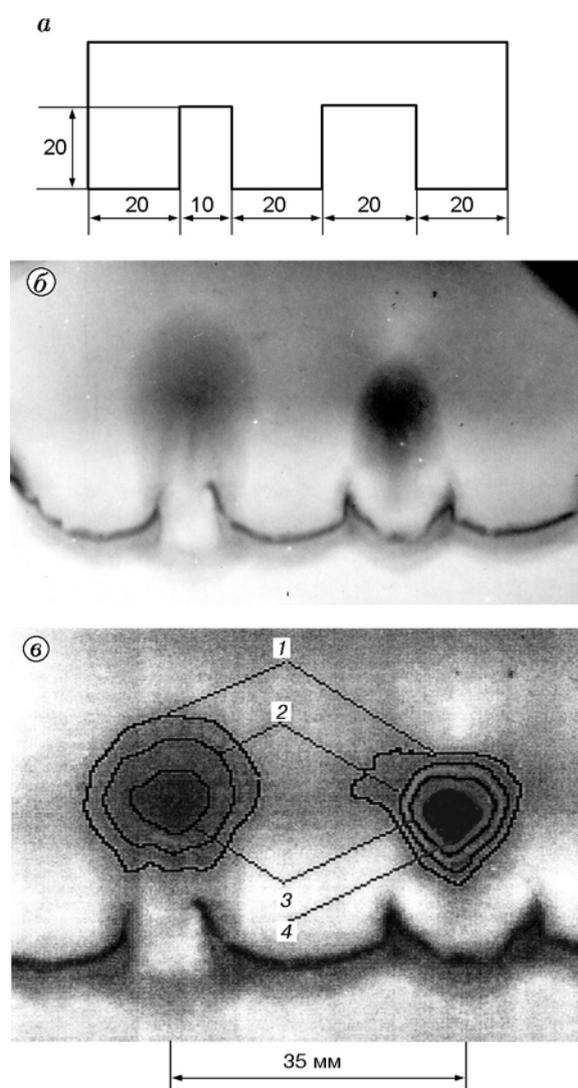


Рис. 5. Схема «совмещенного» (№ 3 и № 4) заряда (а). Рентгенограммы процесса в опыте с зарядом № 3 (б, справа) и заряда № 4 (в, слева). Диаграмма плотностей ПВ в них (г), $\rho_{\text{ПВ}}$, г/см³: 1 — 0,31; 2 — 0,33; 3 — 0,36; 4 — 0,39

ветствующих различным толщинам ВВ, находили зависимость степени почернения рентгеновской пленки от параметра ρd , где $\rho = 1,52$ г/см³.

Точность определения плотности ПВ в диапазоне $\rho_{\text{ПВ}} = 2 \div 0,25$ г/см³ по описанной методике составляет 15 ÷ 25 %. Более низкие значения плотности определяются лишь качественно. Тем же методом определена плотность ПВ в работе [8].

При одинаковой длине заряда ($L = 20$ мм)

Таблица 2

Номер заряда	a , см	b , см	c , см	V , см ³
1	3,3	4,8	1,3	20
3	3,6	5,4	3,0	58
4	2,3	5,4	3,0	37

максимальная плотность сжатой области ПВ, равная $0,42 \div 0,39$ г/см³, достигнута в экспериментах с зарядом № 3, а минимальная плотность, равная $\approx 0,36$ г/см³, — с зарядами № 1 и № 4. Указанные значения плотностей в пределах ошибки эксперимента совпадают. Поэтому был проведен сравнительный эксперимент с «совмещенными» (№ 3 и № 4) зарядами (рис. 5, а). Рентгенограмма получена спустя 4,3 мкс после окончания детонации и приведена на рис. 5, б. Визуальное сравнение показывает, что при использовании заряда с квадратной полостью (заряд № 3) достигнута, безусловно, более высокая плотность ударно-сжатых ПВ, чем при использовании заряда № 4, где $L/d = 2$. Этот вывод подтверждают и результаты измерения плотности ПВ, приведенные на рис. 5, в. При этом объем сжатых ПВ в первом случае почти в два раза меньше, чем во втором. Более высокие значения плотности ПВ в опыте с зарядом № 3 можно объяснить тем, что в нем область высокой плотности формируется по схеме двукратного сжатия.

Результаты рентгенографических исследований были дополнены экспериментами по изучению кумулятивного эффекта зарядов № 1, № 3 и № 4 на стальных преградах. Постановка экспериментов отличается от схемы, приведенной на рис. 2, лишь тем, что отсутствовала индикаторная пластина и пенопластовое основание было заменено массивной плитой из стали Ст. 20 толщиной 30 мм. Результаты измерений кумулятивного эффекта приведены в табл. 2, где a — длина, b — ширина в направлении, перпендикулярном плоскости рис. 2, c — глубина, V — объем кумулятивной выемки. Из таблицы видно, что при одинаковой длине заряда максимальная глубина пробития достигнута при работе с зарядами № 3 и № 4, где она равна 30 мм, интегральный же кумулятивный эффект максимален для заряда № 3, где объем воронки и соответственно произведенная работа в $\approx 1,6$ раза больше, чем для заряда № 4.

Полученные результаты можно объяснить следующим образом. В эксперименте с зарядом № 4 масса ударно-сжатых ПВ существенно больше, чем при работе с зарядом № 3 (см. рис. 5), и соответственно формируется более длинная струя. В то же время в заряде № 3 формирование струи происходит из более плотной области, и потому струя обладает более высоким значением динамического напора. Для заряда № 1 кумулятивный эффект незначителен. Ударно-сжатая область в нем, по-видимому, при взаимодействии со стальной преградой распадается, не успев сформировать струю.

Таким образом, результаты измерения параметров кумулятивных кратеров согласуются с данными рентгенографических исследований и совместно с ними доказывают формирование в П-образных зарядах небольшого удлинения ($L/d = 0,5 \div 3$) высокоскоростной струи согласно механизму [6]. Экспериментально показано, что первоначально в воздушной полости формируется ударно-сжатая область ПВ, из которой после завершения детонации заряда формируется высокоскоростная струя со скоростью, большей скорости детонации ВВ и обладающей кумулятивным эффектом. При одинаковой длине максимальным кумулятивным эффектом на стальных мишенях обладают заряды с квадратной воздушной полостью.

Авторы выражают благодарность Ю. М. Макарову за поддержку и внимание при выполнении работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Веселов В. Н., Демидов В. А., Мешков Е. Е., Фетисов И. К.** Взрывной размыкатель электрической цепи. Авторское свидетельство № 1376818. БИ. 1999. № 24. С. 616.
2. **Мержиевский Л. А., Титов В. М., Фадеев Ю. И., Швецов Г. А.** Высокоскоростное метание твердых тел // Физика горения и взрыва. 1987. Т. 23, № 5. С. 77–91.
3. **Загуменнов А. С., Титова Н. С., Фадеев Ю. И., Чистяков В. П.** Детонация удлиненных зарядов с полостями // ПМТФ. 1969. № 2. С. 79–83.
4. **Пряхин Г. В., Титов В. М., Швецов Г. А.** Исследование высокоскоростных потоков газа электромагнитным методом // ПМТФ. 1971. № 3. С. 137–140.
5. **Тарасов М. Д., Толшмяков А. И., Петушков В. С. и др.** Кумулятивные струи в микроканалах взрывчатого вещества // Физика горения и взрыва. 1999. Т. 35, № 3. С. 140–142.
6. **Физика взрыва** / Ф. А. Баум, Л. П. Орленко, К. П. Станюкович, В. П. Челышев, Б. И. Шехтер / Под ред. К. П. Станюковича. М.: Наука, 1975.
7. **Лобанов В. Ф., Фадеев Ю. И.** Кумуляция продуктов детонации полого заряда // Физика горения и взрыва. 1974. Т. 10, № 1. С. 119–124.
8. **Зубков П. И., Кулипанов Г. Н., Лукьянчиков Л. А. и др.** Возможности синхротронного излучения для исследования детонационных процессов // 12-й Симпозиум по горению и взрыву. Химическая физика процессов горения и взрыва. Черногоровка: ИПХФ РАН, 2000. Ч. II. С. 177–178.

*Поступила в редакцию 14/V 1997 г.,
в окончательном варианте — 15/IV 2001 г.*