

УСКОРЕНИЕ ТВЕРДЫХ ЧАСТИЦ ПРИ КУМУЛЯЦИИ ПРОДУКТОВ ДЕТОНАЦИИ В ВАКУУМЕ

П. А. Лазорский*, А. В. Пластинин, В. В. Сильвестров, В. М. Титов

* Новосибирский государственный университет, 630090 Новосибирск
Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, 630090 Новосибирск

Проанализирована возможность повышения скорости метания твердых частиц при взрыве длинного трубчатого заряда мощного взрывчатого вещества (ВВ) в вакууме. Полученные экспериментальные результаты указывают на невозможность существенного повышения скорости метания. Предполагаемые причины — эрозия материала с внутренней поверхности трубки ВВ и значительное снижение массовой скорости течения при увеличении длины трубки ВВ больше оптимальной.

При взрыве осесимметричного трубчатого заряда мощного взрывчатого вещества (ВВ) во внутреннем канале возникает струйное течение газообразных продуктов детонации (канальная волна), скорость которого значительно превышает скорость детонации [1]. При использовании ВВ со скоростью детонации $D = 7 \div 8$ км/с скорость течения W достигает $10 \div 13$ км/с [2]. В настоящее время механизм возникновения высокоскоростной струи связывается с кумуляцией продуктов взрыва, разлетающихся внутрь с внутренней поверхности заряда. Авторы работы [3] предложили использовать этот эффект для ускорения прочных твердых частиц до скоростей ≈ 10 км/с. Метаемая сферическая частица размещается на оси трубки ВВ на пути высокоскоростного потока и за счет аэродинамического увлечения ускоряется. Скорость метания ограничена скоростью потока и запасом массы толкающего газа, иначе — длиной газокумулятивной струи. Были реализованы устройства со скоростью метания от 1 до $11 \div 14$ км/с частиц размером от $0,1 \div 1$ мм.

Основные параметры газокумулятивных струй, определяющие скорость метания, — скорость головы струи, распределение скорости течения по длине струи, плотность, длительность течения. Влияние геометрических размеров заряда на эти параметры подробно исследовано в работах [4–8]. Трубчатые взрывные ускорители твердых частиц нашли достаточно широкое применение в исследованиях по высокоскоростному удару [9–11]. Большинство опытов с использованием этого метода ускорения выполнено в воздухе при нормальном атмосфер-

ном давлении, без вакуумирования внутреннего канала заряда ВВ. В работе [7] отмечено, что на стадии отработки методики ускорения отдельные эксперименты были выполнены в вакууме при давлении в несколько торр и при сохранении неизменной геометрии заряда ВВ прирост скорости метания частицы составил не более 10 % относительно значения скорости при взрыве в воздухе при давлении $p = 1$ атм.

Вместе с тем скорость головной ударной волны, движущейся в канале заряда перед струей продуктов детонации, существенно различна в воздухе при $p = 1$ атм и в вакууме при $p \approx 1$ Торр. Это следует из рис. 1, где x/d_1 — безразмерное расстояние, пройденное фронтом волны (d_1, d_2 — внутренний и внешний диаметры трубки ВВ). Измерения выполнены при помощи ионизационных датчиков или оптической

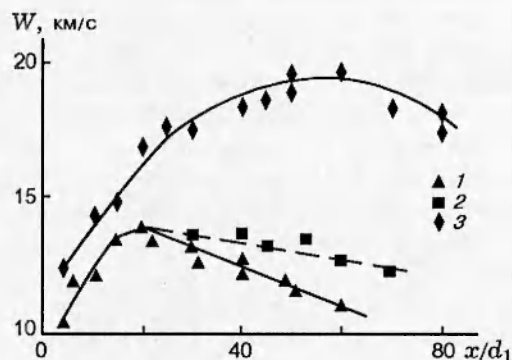


Рис. 1. Скорость канальной волны вдоль оси заряда ВВ (литой состав ТГ 50/50, $d_1 = 10$ мм, $d_2 = 24$ мм):

1, 3 — в канале заряда ВВ, 2 — в стальной трубке; $p = 1$ атм (1, 2), $p \approx 1$ Торр (3)

фоторазвертки [5]. При $x/d_1 > 25$ скорость течения падает, а на расстоянии $x/d_1 \geq 100$ в воздухе $W \leq D$ и возникает вторая канальная волна [4]. Таким образом, в случае взрыва в воздухе при $p = 1$ атм явление развитой кумуляции продуктов детонации, сопровождающееся ростом скорости канальной волны, характерно для начального (переходного) режима неустановившегося течения в канале заряда при $x/d_1 < 25$ (см. рис. 1). Исследования характера изменения скорости канальной волны при взрыве в вакууме зарядов длиной $x/d_1 \geq 80$ авторам неизвестны.

Прямые измерения временного профиля массовой скорости $U(t)$ продуктов детонации в газокумулятивной струе выполнены в [7] электромагнитным методом для зарядов из литого ТГ 50/50 при $d_1 = 5$ мм, $d_2 = 10$ мм. Значение скорости в головной части течения $U_h = 11 \div 12$ км/с согласуется с данными ионизационных датчиков и оптических измерений (в предположении одномерности течения и с учетом ударной адиабаты воздуха [12]). Спустя ≈ 2 мкс скорость течения падает и выходит на плато с постоянным значением скорости $U_0 \approx 10$ км/с в воздухе и $\approx 10,9$ км/с в вакууме. Длительность течения с постоянной скоростью в сечении $x/d_1 = 20$ при взрыве в воздухе составляет 6 мкс, при вакуумировании центрального канала — 8 мкс. Это соответствует длине струи, равной приблизительно половине длины продетонировавшего заряда. Все измерения в [7] проведены при $x/d_1 = 20 \div 25$, что соответствует участку, где достигается максимальная скорость течения при взрыве в воздухе (см. рис. 1). К сожалению, тогда не были выполнены аналогичные измерения в вакууме при $x/d_1 = 50 \div 60$, где оптические измерения показывают максимальную скорость головной ударной волны.

Основной причиной падения скорости течения при $x/d_1 > 25$ при взрыве в воздухе является, по-видимому, тепловое и механическое взаимодействие высокоскоростного потока со стенками канала из ВВ. Эрозия вызвана как движением пробки ударно-сжатого воздуха перед струей, нагретого до температуры $\approx 20 \cdot 10^3$ К [12], так и трением о стенку относительно холодных продуктов детонации. Разделить влияние этих двух факторов очень сложно. В результате интенсивной эрозии материала стенок канала увеличивается масса газа в струе, а кинетическая энергия струи расходует-

ся на ускорение дополнительной массы до скорости спутного потока. Это приводит к постепенному падению массовой скорости основной части струи, выполняющей роль толкающего поршня для головной ударной волны в воздухе, скорость которой собственно и определяется в эксперименте. С этим предположением согласуются и данные рис. 1, где приведены результаты опытов, в которых канал заряда ВВ при $x/d_1 \geq 25$ был продолжен стальной трубкой: наблюдается более медленное падение скорости канальной волны. В этом случае вклад потерь за счет эрозии существенно меньше, чем для стенки из ВВ, материала со значительно меньшей температурой плавления и прочностью, чем у стали. В [13] приведены результаты расчетных оценок теплового воздействия со стороны газокумулятивной струи на поверхность заряда ВВ в плоском случае, которые указывают на возможность существенного изменения процесса формирования струи за счет пристеночных явлений, вплоть до полного подавления кумуляции.

Исходя из проведенного анализа существующих данных, можно предположить, что при взрыве трубчатого заряда ВВ в вакууме можно существенно увеличить эффективную для метания твердых частиц длину газокумулятивной струи как за счет «интегрального» увеличения скорости течения, так и за счет выбора более длинных зарядов ВВ и в конечном итоге повысить скорость метания относительно наблюдаемой при взрыве в воздухе. В связи со сказанным авторы считали целесообразным проверить и уточнить данные по увеличению скорости метания трубчатым зарядом в вакууме, реализовать ускорение частиц в вакууме трубчатым зарядом ВВ с существенно увеличенной длиной (до $50 \div 60$ диаметров канала).

Схема экспериментальной сборки представлена на рис. 2. Заряд установлен по центру алюминиевой трубы с внутренним диаметром 115 мм с помощью вакуумно-герметичной втулки. Расстояние между торцом трубки ВВ и нижним фланцем трубы 12 см. В нижнем фланце имелось отверстие для выхода ускоренной частицы из вакуумированного объема, закрытое диафрагмой из алюминизированной полимерной пленки толщиной 20 мкм. На первых десятках сантиметров траектории вне заряда ВВ газокумулятивная струя опережает метаемую частицу, взаимодействует с диафрагмой до прихода частицы, тонкая пленка раз-

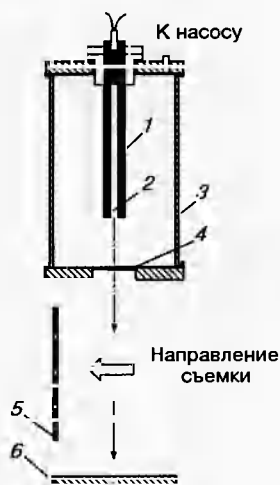


Рис. 2. Постановка опытов по ускорению стальных частиц в вакууме:

1 — заряд ВВ, 2 — метаемая частица, 3 — труба из алюминия с фланцами, 4 — диафрагма, 5 — шит с масштабными метками, 6 — пластина-свидетель из дюралюминия

рывается и не препятствует выходу частицы из объема. Внутренний объем трубы вакуумировался до давления $0,1 \div 1$ Торр. Траектория частицы фиксировалась с помощью оптического фоторегистратора вне вакуумированного объема при движении частицы в воздухе. На рис. 3 приведены характерные фоторегистрограммы опытов. Целостность высокоскоростной частицы после ускорения контролировалась по наличию только одного кратера на пластине-свидетеле.

Для первой серии экспериментов был выбран заряд из сплава ТГ 50/50 ($d_1 = 10$ мм, $d_2 = 24$ мм, длина канала $l = 250$ мм, $l/d_1 = 25$). Такой заряд при заглублении стальной частицы (шарика) диаметром $d_0 = 1$ мм на расстоянии $h = 50$ мм от торцевого среза канала сообщает ей скорость $v_p = 7 \div 7,3$ км/с [5]. В контрольном опыте при взрыве в воздухе $v_p = (6,96 \pm 0,05)$ км/с. Незначительное уменьшение скорости частицы в воздухе относительно приводимой в [5] обусловлено аэродинамическим торможением на несколько увеличенной пролетной базе, что связано с сохранением геометрии опыта в воздухе и в вакууме. При взрыве в вакууме (см. рис. 3,а) $v_p = (7,49 \pm 0,03)$ км/с, среднее значение по двум экспериментам. Таким образом, возрастание скорости метания в вакууме, оцененное в [7] с помощью простейшей контактной методики (пробой частицей двух разнесенных тонких фольг), оказалось доста-

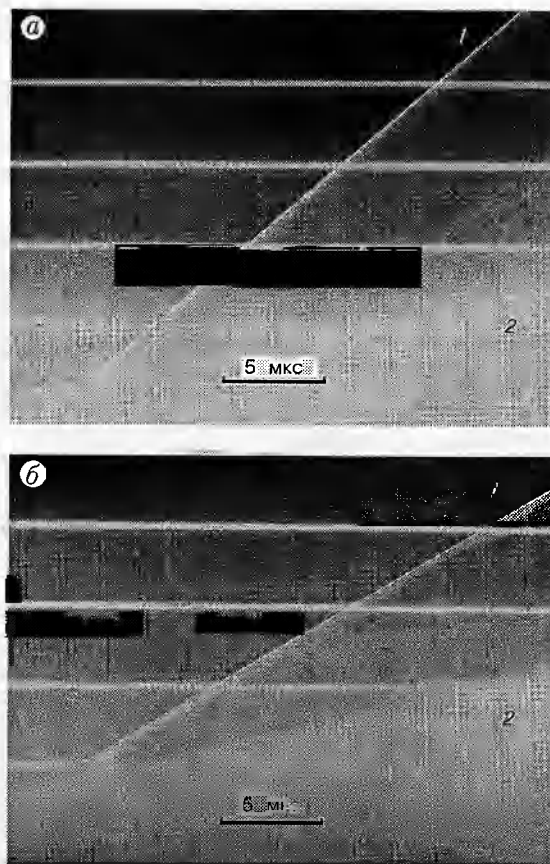


Рис. 3. Регистрограммы опытов по ускорению стального шарика в вакууме зарядом длиной 25 см (а) и 50 см (б):

масштабные метки — через 30 мм; 1 — траектория ускоренного шарика, 2 — траектория струи продуктов детонации

точно точным, в данном случае скорость частицы возросла при ускорении в вакууме на 7 %.

Во второй серии экспериментов длина заряда ВВ была увеличена до 500 мм ($l/d_1 = 50$). При использовании таких относительно длинных зарядов в воздухе скорость метаемых частиц падает, и частицы часто разрушаются. Трубка из ВВ была продолжена дополнительным стволом — трубкой из эбонита с диаметром канала 10 мм и длиной 100 мм. При выбранной длине заряда ВВ скорость канальной волны достигает максимума (см. рис. 1), и ожидалось существенное увеличение скорости метания. Стальной шарик с $d_0 = 1$ мм был установлен на торце заряда ВВ. При метании с торца в воздухе без ствола при $l = 250$ мм получено, что $v_p = 5,5$ км/с [5]. Применение дополнительного ствола позволило увеличить скорость метания (при прочих равных условиях) с 3 до

5 км/с при метании с торца стального шарика диаметром $d_0 = 2$ мм [6]. Поэтому был поставлен дополнительный эксперимент со стволом в вакууме при $l = 250$ мм, $d_0 = 1$ мм. В этом случае $v_p = (6,48 \pm 0,05)$ км/с. Именно это значение должно рассматриваться в качестве исходного для анализа результата опыта с $l = 500$ мм.

При метании частицы в вакууме зарядом длиной 500 мм скорость частицы составила $(5,4 \pm 0,05)$ км/с (см. рис. 3,б). Шарик после ускорения остался целым. Размер частицы d после ускорения, уменьшающийся за счет абляции, был оценен по глубине кратера P_c на пластине-свидетеле и по известной для дюралюминия зависимости $P_c/d = f(v_p)$. Он составил всего $d = 0,6$ мм. При ускорении в воздухе и заглублинии $h = 50$ мм и $h = 0$ $d = 0,83$ и $0,9$ мм при $v_p = 7,3$ и $5,5$ км/с соответственно [5]. Таким образом, в опыте с увеличенной длиной трубки ВВ не зарегистрировано предполагаемого существенного увеличения скорости метания. Более того, скорость метания уменьшилась на 1 км/с по сравнению с опытом, где $l/d_1 = 25$. Примерно в 1,5 раза уменьшился и конечный диаметр ускоренной частицы.

Результаты эксперимента с увеличенной длиной трубки ВВ можно объяснить следующим образом. За счет удлинения заряда и вакуумирования скорость головы струи и длина газокумулятивной струи действительно возрастают. Но эрозия материала стенок канала также возрастает, прежде всего из-за удлинения заряда и, возможно, за счет увеличения скорости движения продуктов взрыва относительно стенки канала. Это приводит к увеличению плотности струи и значительному уменьшению массовой скорости потока внутри струи даже по сравнению со взрывом в воздухе более коротких зарядов. В результате скорость метания падает, и метаемая частица обгорает сильнее.

Таким образом, применение длинных трубчатых зарядов ВВ при взрыве в вакууме не позволяет увеличить скорость метания стальных частиц относительно той, которая реализована ранее при использовании зарядов с оптимальной длиной ($l/d_1 = 25$).

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 96-15-96264) и Федеральной целевой программы «Государственная поддержка интеграции высшего образования и

фундаментальной науки на 1997–2000 гг.» (проект 274 по направлению «Фундаментальные исследования в области физики и высоких технологий»).

ЛИТЕРАТУРА

1. Woodhead D. M. Velocity of detonation of a tubular charge of explosive // *Nature*. 1947. V. 160, N 4071. P. 644.
2. Woodhead D. M. and Titman H. Detonation phenomena in a tubular charge of explosive // *Explosivstoffe*. 1965. V. 13, N 5. P. 113–123.
3. Титов В. М., Фадеенко Ю. И., Титова Н. С. Разгон твердых частиц кумулятивным взрывом // Докл. АН СССР. 1968. Т. 180, № 5. С. 1051–1053.
4. Загуменнов А. С., Титова Н. С., Фадеенко Ю. И. и др. Детонация удлиненных зарядов с полостями // ПМТФ. 1969. № 2. С. 79–83.
5. Титов В. М., Швецов Г. А. Лабораторные методы высокоскоростного метания твердых тел взрывом // *Физика горения и взрыва*. 1970. Т. 6, № 3. С. 401–405.
6. Сильвестров В. В., Урушкин В. П. Метод определения плотности высокоскоростных газовых струй // *Динамика сплошной среды: Сб. науч. тр. / АН СССР, Сиб. отд-ние, Ин-т гидродинамики*. 1971. Вып. 7. С. 125–129.
7. Пряхин Г. В., Титов В. М., Швецов Г. А. Исследование высокоскоростных потоков газа электромагнитным методом // ПМТФ. 1971. № 3. С. 137–140.
8. Fadeenko Yu. I., Lobanov V. F., Sil'vestrov V. V., Titov V. M. High speed gas flows in explosions of cavitated explosives // *Acta Astronautica*. 1974. V. 1. P. 1171–1179.
9. Мерзиевский Л. А., Титов В. М. Высокоскоростной удар (Обзор) // *Физика горения и взрыва*. 1987. Т. 23, № 5. С. 92–109.
10. Bashurov V. V., Bebenin G. V., Belov G. V. et al. Experimental modelling and numerical simulation of high- and hypervelocity space debris impact to spacecraft shield protection // *Intern. J. Impact Engng*. 1997. V. 20, N 1–5. P. 69–78.
11. Белов Г. В., Голубев В. К., Юткина Н. А. Повреждение стальной преграды при высокоскоростном ударе // *Физика горения и взрыва*. 1997. Т. 33, № 1. С. 119–121.
12. Кузнецов Н. М. Термодинамические функции и ударные адиабаты воздуха при высоких давлениях. М.: Машиностроение, 1965.
13. Бывших А. И. Численное исследование тепловых процессов при газовой кумуляции: Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. Красноярск, 1997.

Поступила в редакцию 20/XI 1998 г.