

# СИММЕТРИЯ И ХАРАКТЕР ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПРИ ГИПЕРСКОРОСТНОМ УДАРЕ

М.А. Лебедев, Б.В. Литвинов

Российский федеральный ядерный центр — ВНИИ технической физики, г. Снежинск, Россия

М.М. Русаков

Тольяттинский политехнический институт, Тольятти, Россия

## 1. Введение

Начиная с 1964 г., в РФЯЦ — ВНИИТФ авторы доклада экспериментально исследовали действие ударника (снаряда) в виде компактной массы (сгусток частиц вольфрама с плотностью  $g/cm^3$ , массой  $0,2\text{ г}$  и скоростью  $24\text{ км/с}$ ) на преграды из различных материалов. Сгусток двигался по каналу диаметром  $5\text{ мм}$  и перед ударом о преграду имел длину  $10\text{ мм}$ . Экспериментально исследовались возникающие при этом явления, в числе которых — повреждение преград [1, 2], реактивный импульс\* [3] и характер выделения энергии [4, 5] при торможении ударника.

## 2. Результаты экспериментов

В опытах [4] реализовалась физическая картина развития процесса взаимодействия (частичный взрыв при ударе и последующее проникание), которая оказалась промежуточной между полным взрывом ударника на поверхности преграды и взрывом в преграде после проникания. Так, на рис. 1 приведены результаты высокоскоростной покадровой съемки процесса взаимодействия сгустка с преградой из оргстекла. Регистрация проводилась в проходящем свете, создаваемом подсветкой от заряда взрывчатого вещества (ВВ). Частота съемки составляла  $2,5 \cdot 10^5\text{ кадр/с}$ .

На этой фотографии видно, что после удара сгустка о преграду в воздухе распространяется УВ, аналогичная УВ, наблюдаемой при взрыве в воздухе. Яркость этой волны выше яркости подсветки.

В последующие моменты процесс взаимодействия между сгустком и преградой носит характер высокоскоростного проникания сгустка в преграду. Таким образом, видно, что в первый момент только часть кинетической энергии сгустка переходит в тепловую и реализуется в форме взрыва, а оставшаяся часть расходуется при проникании сгустка в преграду.

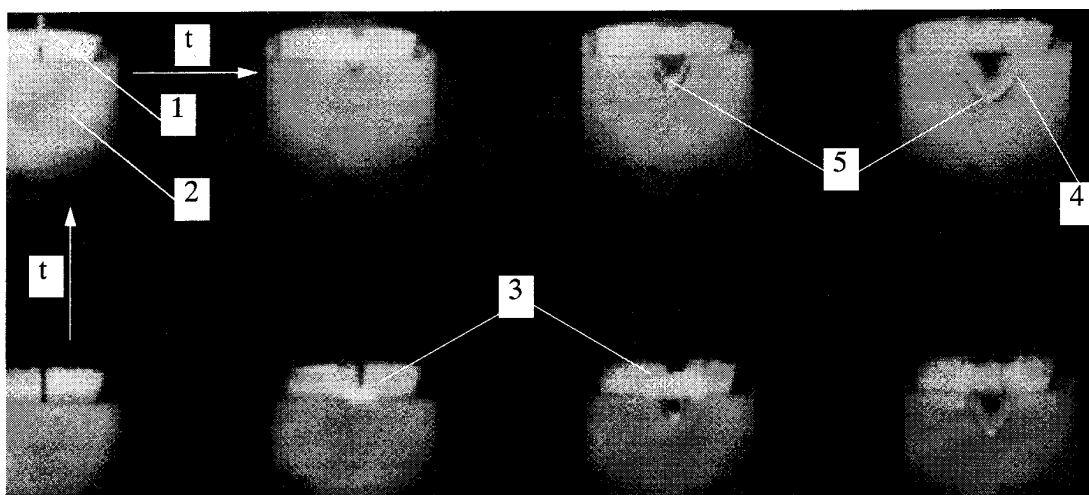


Рис. 1. Взаимодействие сгустка частиц вольфрама с преградой:

\* его величина превысила количество движения сгустка всего в 2,6 раза, в то время как расчет К.П. Станюковича [6], предполагающий взрыв ударника на поверхности преграды, дает значение этого отношения равное 7.

1 — сгусток перед соударением; 2 — преграда из оргстекла; 3 — ударная волна (УВ) в воздухе; 4 — УВ в оргстекле; 5 — сгусток в преграде.

И только при встречном столкновении сгустков удалось осуществить их “быстрое” полное торможение что и демонстрирует приведенная на рис. 2 фотография встречного столкновения сгустков в оргстекле с частотой съемки  $2 \cdot 10^6$  кадр/с, где видна практически сферическая УВ с начальной скоростью  $10,5$  км/с.

Энергия и характер ее выделения при соударении ударника с преградой (парафин, оргстекло, вольфрам, абсолютно-жесткая стенка\* определялись как на границе с воздухом, так и внутри преграды.

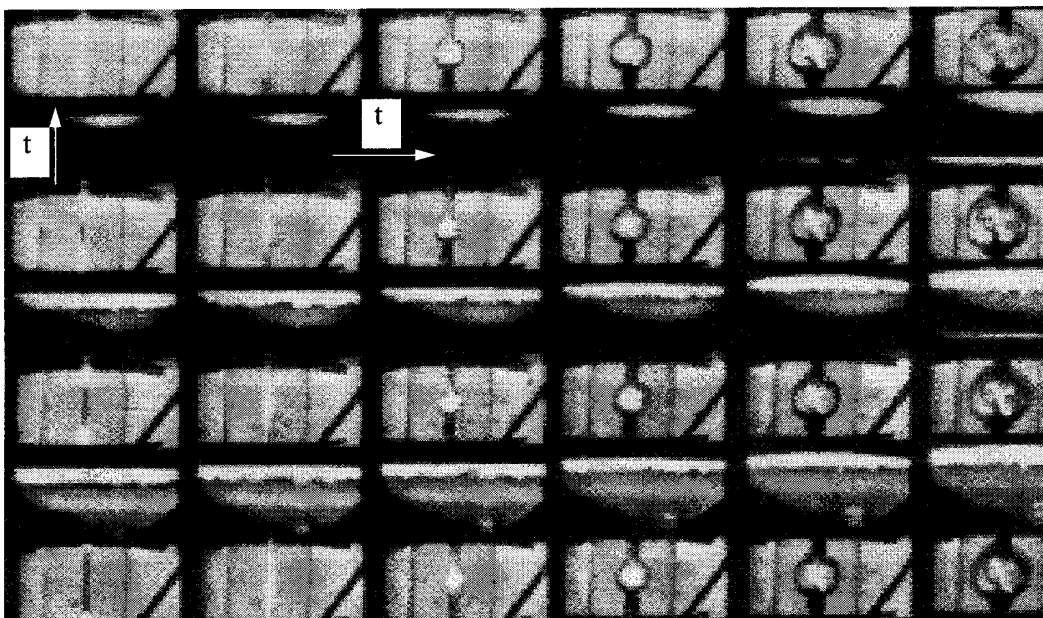


Рис. 2. Встречное столкновение сгустков в оргстекле.

При определении количества энергии, выделяющейся в форме взрыва, использовалось решение Л. И. Седова [7] задачи о сильном взрыве для цилиндрической симметрии.

С этой целью в опытах по определению энергии взрыва на поверхности преграды параллельно ее поверхности и на расстоянии  $20$  мм от нее устанавливался стальной экран, который создавал условия для цилиндрической симметрии взрыва. В проведенных опытах сгусток ударял в парафиновые и вольфрамовые преграды.

Вычисленная по полученным законам затухания УВ и решению Л.И. Седова величина энергии взрыва получилась равной  $9,3$  кДж и  $14,5$  кДж для преграды из парафина и вольфрама, соответственно, что эквивалентно  $2,3$  и  $3,5$  г тринитротолуола (ТНТ). Это составляет  $19$ – $29\%$  от кинетической энергии сгустка, эквивалентной  $\sim 12$  г ТНТ, и наглядно показывает влияние свойств преграды на характер перехода кинетической энергии сгустка в другие формы.

При определении энергии взрыва встречного столкновения в воздухе сгустки подводились по трубке из оргстекла с толщиной стенки  $0,3$  мм [5]. Для формирования цилиндрической симметрии взрыва образующаяся при этом УВ ограничивалась двумя расположенными симметрично месту столкновения и перпендикулярно движению сгустков стальными экранами при расстоянии между ними  $20$  мм.

Энергия взрыва оказалась эквивалентной  $24,6$  г ТНТ, а начальная скорость УВ в воздухе  $23$  км/с (при взрыве ТНТ начальная скорость УВ в воздухе  $\sim 7,5$  км/с).

Другими словами, в этих опытах, используя встречное столкновение двух масс вещества с объемной концентрацией кинетической энергии, в  $40$  раз превышающей концентрацию энергии взрывчатого вещества типа ТНТ, в лабораторных условиях получен сильный, практически точечный взрыв.

\* абсолютная-жесткая стенка (преграда) имитировалась встречным столкновением сгустков, как непосредственным, так и, в первом приближении, через прокладку из парафина.

Опыты по столкновению сгустков в цилиндрах из стали проводились без регистрации процесса развития взрыва и преследовали цель, — путем определения формы и размеров образующейся при столкновении полости, оценить характер и работу расширения “продуктов взрыва”.

В этих опытах осуществлялось как непосредственное столкновение сгустков, так и через пробку из парафина. Постановка опытов и вид образовавшихся после взрыва полостей в стальных цилиндрах показаны на рис. 3.

Полость, образовавшаяся при непосредственном столкновении сгустков, имеет заметно вытянутую форму и объем  $10,5 \text{ см}^3$ , а при столкновении сгустков через парафин имеет форму более близкую к сферической и объем  $22 \text{ см}^3$ .

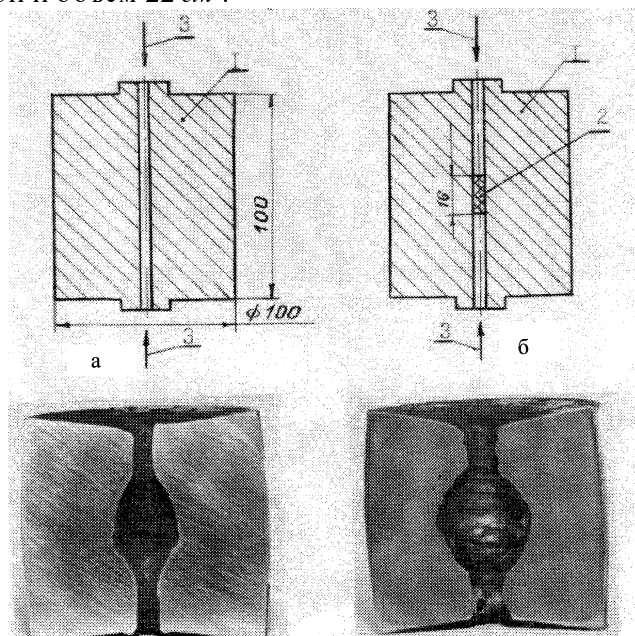


Рис. 3. Схема опытов и вид полостей в стали, образовавшихся после столкновения сгустков:

а — непосредственное столкновение; б — столкновение через парафин; 1 — стальной цилиндр; 2 — парафин; 3 — сгусток частиц вольфрама.

Используя эти экспериментальные данные по теории Г. Гопкинса [8] для полостей, образовавшихся при сферически-симметричном взрыве, и приняв, согласно [9], динамический предел текучести для стали марки Ст. 3  $\sigma_T = 8,4 \cdot 10^8 \text{ Па}$ , была определена величина энергии, отобранной средой, которая оказалась эквивалентной  $8,5 \text{ г}$  ТНТ, при непосредственном столкновении, и  $18 \text{ г}$  ТНТ, при столкновении через парафин.

### 3. Обсуждение результатов

3.1. В опытах с ударом по преграде интересен не только факт, что количество выделившейся на ее поверхности энергии не превышает 30% от кинетической энергии сгустка (т. е. картина соударения еще не похожа на точечный поверхностный взрыв и эта асимптотика [10], по-видимому, еще далека), но и зависит от свойств преграды. Последний результат позволяет прогнозировать параметры взрыва для широкого диапазона свойств ударников и преград.

Так, из графика рис. 4, построенного всего по двум экспериментальным точкам (парафин и вольфрам) и потому, естественно, в линейном приближении, можно видеть, что акустические жесткости ( $\rho \cdot C$ ) практически всех мыслимых преград, включая и горные породы, располагаются в исследованном диапазоне.

При построении использовались следующие значения акустических жесткостей преграды и сгустка:

- для парафина  $\rho C = 1,3 \cdot 10^6 \text{ кг/(м}^2 \cdot \text{с)}$ ;
- для вольфрама  $\rho C = 1 \cdot 10^8 \text{ кг/(м}^2 \cdot \text{с)}$ ;

– для сгустка (ударника)  $\rho C = 2,8 \cdot 10^6 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})^*$ .

3.2. При встречном столкновении сгустков в стали обращает на себя внимание большая разница в объемах полостей, что можно объяснить образованием из парафина дополнительного количества и изменением свойств “продуктов взрыва”.

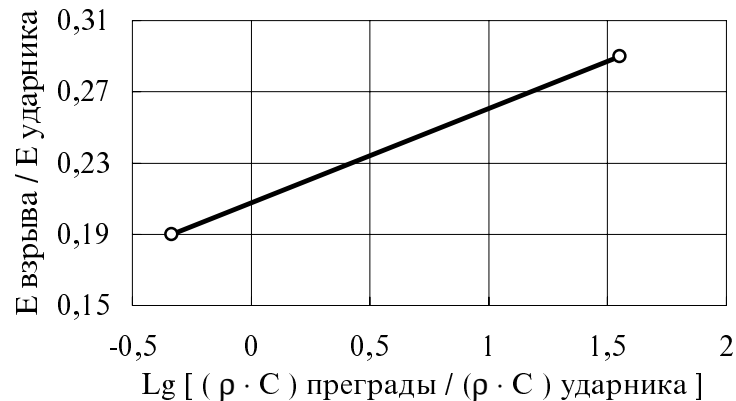


Рис. 4. Зависимость энергии взрыва от жесткости преграды.

Действительно, согласно первому закону термодинамики теплота,  $\Delta Q$ , получаемая системой при торможении сгустков, равна сумме работы  $\Delta A = P \cdot \Delta V$ , затем совершаемой системой, и изменению ее внутренней энергии  $\delta U$ :

$$\Delta Q = \Delta A + \delta U.$$

При этом известно, что  $\delta U$  не зависит от пути процесса и определяется параметрами начального и конечного состояний системы, а  $\Delta Q$  и  $\Delta A$ , наоборот, зависят от характера процессов перехода из начального в конечное состояние.

У нас теплота, получаемая системой при торможении сгустков, одна и та же в обоих случаях:

как при непосредственном столкновении сгустков

$$\Delta Q = \Delta A_1 + \delta U_1,$$

так и при столкновении через парафин

$$\Delta Q = \Delta A_2 + \delta U_2.$$

Отсюда, с очевидностью, следует, что

$$\Delta A_1 + \delta U_1 = \Delta A_2 + \delta U_2,$$

где (так как в эксперименте получено  $\Delta A_2 > \Delta A_1$ ), выполняется неравенство  $\delta U_1 > \delta U_2$ , Но это неравенство будет противоречить первому закону термодинамики, если считать оба случая столкновения одинаковыми системами.

Таким образом, мы получили важное, на наш взгляд, доказательство не учитываемой рядом исследователей при подготовке, проведении экспериментов и анализе их результатов системности процесса столкновения и тому, что, вводя в первую систему (движущиеся навстречу два сгустка + окружающая среда) парафин, мы получаем не нарушение законов термодинамики, а другую систему (движущиеся навстречу два сгустка + окружающая среда + парафин) с существенно отличными от первой свойствами.

3.3. Это вполне согласуется с нашей методологической позицией:

– о системности динамических процессов, развиваемой нами на примере формирования и развития взрыва [11–13]. Процесс гиперскоростного соударения также необходимо рассматривать, исследовать и разрабатывать как систему, обладающую своими специфическими свойствами;

\* значение принято равным акустической жесткости оргстекла, так как при ударе сгустка по оргстеклу скорость его проникания, определенная в [1] экспериментально, оказалась близка к половине скорости полета к преграде

– о влиянии симметрии, во всем многообразии ее форм и проявлений [14–16], на конечный результат, который получается автоматически, т. е. как следствие сформированной системы, например, взрывного устройства.

Действительно, сравнение результатов двух опытов по встречному столкновению сгустков (рис. 3) с позиции идей и принципов симметрии наглядно демонстрирует, что определенная симметрия причин вызывает соответствующую симметрию действия, которая изменяется по мере вовлечения в процесс новых характеристических симметрий. Так, на этапе транспортировки сгустков к месту их столкновения процесс имеет ярко выраженную осевую симметрию с плоскостью симметрии в месте будущего столкновения. После столкновения сгустков эта осевая направленность на первом этапе исчезает, что и проявляется в появлении сферической УВ, видимой на рис. 2. Движущиеся за этой УВ “продукты взрыва” встречают на своем пути каналы, использовавшиеся ранее для транспортировки сгустков и являющиеся элементами осевой симметрии. Но степень их диссимметризирующего влияния на изначально сферический процесс расширения во времени и пространстве при фиксированном диаметре канала будет зависеть от количества вещества, вовлекаемого во взрыв. В случае наличия пробки из парафина это количество больше, а потому влияние канала, хорошо видимое в опыте по рис. 3,а, сказывается позднее и слабее в опыте по рис. 3,б.

#### 4. Заключение

Полученные результаты дополняют знания о сущности процессов гиперскоростного соударения и могут быть использованы в космической технике и при изучении вопроса о защите Земли от опасных космических объектов кинетическим ударом по ним искусственным телом.

#### Литература

1. Русаков М.М. Опытное моделирование метеоритного удара // ПМТФ, 1966, № 4, с. 167–169.
2. Русаков М.М., Лебедев М.А. Ожидаемый размер кратера при ударе микрометеорита // ФГВ, 1987, Т. 23, № 1, с. 95–98.
3. Русаков М.М., Лебедев М.А. Определение реактивного импульса при опытном моделировании метеоритного удара // Космич. исслед., 1968, Т. VI, № 4, 634 с..
4. Русаков М.М., Лебедев М.А. О выделении энергии при моделировании метеоритного удара // Космич. Исслед., 1972, Т. X, № 1, с. 128–129.
5. Лебедев М.А., Русаков М.М. Получение взрыва с высокой концентрацией энергии // ПМТФ, 1973, № 1, с. 168–170.
6. Станюкович К.П. Элементы теории удара твердых тел с большими (космическими) скоростями // Искусственные спутники Земли, 1960, № 4, с. 86–117.
7. Седов Л.И. Методы подобия и размерности в механике. М.: Гостехиздат, 1957.
8. Гопкинс Г. Динамические неупругие деформации металлов. М.: Мир, 1964.
9. Орленко Л.П. Поведение материалов при интенсивных динамических нагрузках. М.: Машиностроение, 1964.
10. Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. М.: Наука, 1966.
11. Лебедев М.А., Литвинов Б.В. Особенности методологии создания взрывных устройств // X Симпозиум по горению и взрыву: Черногловка, 1992. Сборник “Детона-ция”. Тез. докл., с. 41–43.
12. Лебедев М.А., Литвинов Б.В. О методологии проектирования взрывных устройств // Журнал Химическая физика, 1993, Т. 12, № 5, с. 723–726.
13. Lebedev M.A., Litvinov B.V. Methodological view to the explosion process // International Conference “High Pressure Science & Technology”: Warsaw, Poland, 1995. Abstract № 299/ ThP–K9; IV Забабахинские Научные Чтения: Снежинск, 1995, Тез. докл. с. 68–69.
14. Литвинов Б.В., Лебедев М.А. Симметрия и взрывные устройства // III Забабахинские Научные Чтения: Челябинск–70, ВНИИТФ, 1991, Тез. докл. с. 80; журнал Химическая физика, 1993, Т. 12, № 5, с. 726–734.
15. Лебедев М.А., Литвинов Б.В. Симметрия и некоторые кумулятивные явления при взрывах в воде // ФГВ, 1994. Т. 30, № 3, с. 143–146; International Conference “Shock Waves in Condensed Matter”: St. Petersburg, Russia, 1994, Abstract, p. 13.
16. Лебедев М.А., Литвинов Б.В. Симметрия и откольные разрушения // ФГВ, 1995, Т. 31, № 3, с. 54–62.