

ОСОБЕННОСТИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ЧАСТИЦ С ЭКРАНОМ ПРИ УДАРЕ ПОД УГЛОМ

Л. А. Мерзиевский, В. П. Урушкин
(Новосибирск)

Общепризнанным средством защиты от ударов метеоритов является тонкий экран, расположенный на некотором расстоянии от защищаемой поверхности. Основные закономерности взаимодействия и разрушения высокоскоростных частиц при соударении по нормали с экраном — пробиваемой насквозь пластиной — изучены в работе [1]. В [2] рассмотрены результаты воздействия потока образующихся при этом осколков на защищенную поверхность. Обобщение аналогичных исследований, проведенных зарубежными учеными, сделано в [3]. На практике моделируемое высокоскоростным ударом соударение метеоритов с оболочкой космического аппарата должно происходить в большинстве случаев под различными углами к поверхности конструкции. Это приводит к нарушению осевой симметрии процесса, что затрудняет как теоретический анализ явления, так и его моделирование с помощью ЭВМ и интерпретацию экспериментальных данных. Систематическое исследование пробивания пластин под углом к нормали в настоящее время отсутствует. В данной работе сделана попытка восполнить этот пробел в изучении явления высокоскоростного удара.

1. Рассмотрим соударение цилиндра высотой, близкой к диаметру основания, с пластиной толщиной δ . Пусть скорость удара v_0 совпадает по направлению с осью цилиндра и составляет угол α с поверхностью пластины (рис. 1, а). Схематически процесс взаимодействия цилиндра и пластины представлен на рис. 1, б, в. Штриховыми линиями на рис. 1, б показано положение продольных ударных волн в пластине и цилиндре, параметры которых определяются нормальной составляющей скорости соударения, равной $v_0 \sin \alpha$. При $\alpha = 90^\circ$ волновые явления, вызывающие пробивание пластины и разрушение выбитой части и самого цилиндра на осколки, проанализированы детально и неоднократно [1, 3]. При $\alpha \neq 90^\circ$ эти явления осложняются возникновением как в ударяющем теле, так и в преграде сильных волн сдвиговых напряжений, которые хотя и имеют скорости, значительно меньшие скоростей продольных волн, будут оказывать существенное влияние на конечные стадии процесса. Это может привести к изменению характеристик образующегося осколочного облака по сравнению с соответствующими характеристиками при соударении по нормали к поверхности экрана.

Продольная ударная волна раньше всего выйдет на тыльную свободную поверхность пластины в точке, противоположной точке первого контакта цилиндра и пластины (см. рис. 1). В возникающей затем центрированной волне разрежения материал пластины приобретает скорость, направленную по нормали к ее поверхности. Если появляющиеся при этом растягивающие напряжения достаточно велики и существуют достаточно долго, то происходит откол части пластины. В то же время деформирующаяся и разрушающаяся частица продолжает движение в направлении, близком направлению скорости удара. В результате происходит

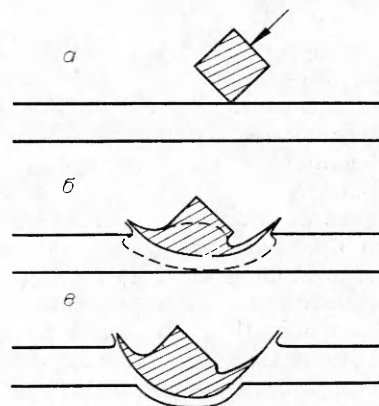


Рис. 1.

отделение потока осколков, образовавшихся при разрушении преграды и имеющих преимущественное направление скорости по нормали к ее поверхности, от потока осколков ударяющего тела, результирующая скорости которых близка по направлению к его первоначальной траектории. Разделение проявляется тем ярвственней, чем меньше угол α . Вследствие разделения потоков осколков появляются на мишени две отличающиеся друг от друга области каверн, соответствующие осколкам разных потоков. В данной работе изучались характеристики каждого из потоков отдельно.

2. Экспериментальное исследование взаимодействия высокоскоростных частиц с экраном проводилось в опытах с металлическими частицами — стальными шарами диаметром $d_0 = 2,3$ мм. Для их разгона применялись газокумулятивные заряды взрывчатого вещества [4], ускорявшие шар до скорости $v_0 = 5 \pm 0,1$ км/с. Угол отклонения траектории частицы от оси заряда не превышал $1-2^\circ$; точность определения диаметра шара в момент соударения с преградой $\sim 5\%$. Ускоренная частица соударялась с экранированной мишенью под углом α к поверхности экрана, представляющего собой тонкую, пробиваемую насквозь пластину толщиной δ . Угол соударения в опытах изменялся от 90 до 30° , толщина экрана — от $0,5$ до 2 мм, толщина мишени в зависимости от условий опыта — от 5 до 20 мм. В качестве материала экрана и мишени во всех опытах использовался дюралюминий.

Конечный результат соударения летящей с высокой скоростью частицы с экранированной мишенью существенно зависит от расстояния между экраном и мишенью. В результате анализа механизмов воздействия осколков на мишень в зависимости от расстояния между экраном и мишенью в [2] установлено, что при расстояниях порядка $(25-30) d_0$ разрушение мишени определяется ударом наиболее крупных осколков рассредоточенного осколочного поля. Исходя из этого, для облегчения трактовки полученных экспериментальных результатов, расстояние между экраном и мишенью сохранялось во всех опытах постоянным и равным 72 мм.

Практически важное значение имеет изучение поражения мишени, защищенной экраном. Вопрос о выборе количественной характеристики степени поражения мишени рассмотрен в [2], где установлено, что в случае дюралюминиевой мишени удобно использовать в качестве такой характеристики глубину наибольшей из образующихся на мишени каверн h . При этом в силу уже упоминавшегося разделения запреградного потока осколков представляет интерес изучение зависимости от условий соударения наибольших каверн от осколков частицы (h_1) и экрана (h_2) отдельно. Глубина каверн измерялась с помощью индикатора глубины; точность измерений не хуже $5-7\%$.

Кроме поражения мишени в экспериментах определялась скорость запреградного потока осколков. Для этого с помощью цифровых электронно-счетных частотомеров измерялись времена прохождения осколками зазора между экраном и мишенью. Запуск четырех хронографов осуществлялся при пробивании контактного датчика, расположенного на тыльной стороне экрана. Четыре контактных датчика, помещенных на поверхности мишени, по два в каждой из зон, перекрываемых осколками частицы и экрана, останавливали хронографы, фиксируя тем самым время пролета лидирующим осколком соответствующего расстояния. Размеры выключающих датчиков 1 см², точность измерения временных интервалов намного превосходит точность измерения всех остальных параметров. Фактически в каждом опыте измерялась максимальная скорость потока осколков в данном направлении. Это соответствует принятому при изучении высокоскоростного взаимодействия определению запреградной скорости осколков [4]. При достаточно тонких преградах эта скорость близка к скорости центра масс деформирующегося тела. Обос-

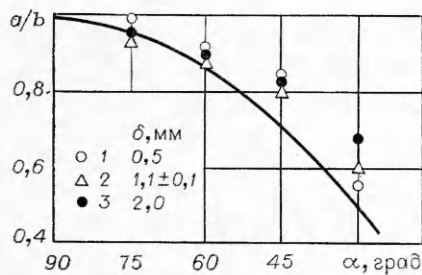


Рис. 2.

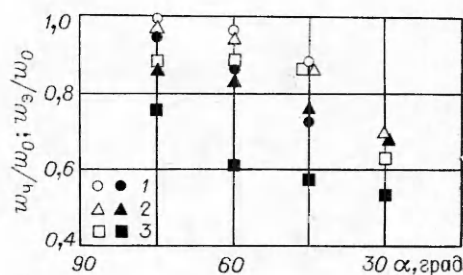


Рис. 3.

нованность такого определения запреградной скорости следует и из экспериментальных результатов работы [5], где показано, что разброс скоростей осколков, летящих в фиксированном направлении, мал.

Все приводящиеся в работе величины определялись по результатам 3—5 опытов. Поскольку датчики, останавливающие хронографы, имели ограниченную площадь, а реальная точка соударения частицы с экраном отличалась от расчетной, то в качестве измеренного значения скоростей выбиралось максимальное из полученных в этих опытах значений. Сопоставление результатов измерений запреградной скорости в случае $\alpha = 90^\circ$ с данными, полученными с помощью рентгеноимпульсной съемки процесса разлета осколков [1], показывает их совпадение; наблюдающиеся расхождения не превосходят ошибки рентгеновской методики.

3. Одним из основных параметров, характеризующих конечный результат соударения высокоскоростной частицы с пробиваемой насквозь преградой, является диаметр пробитого в преграде отверстия. Обобщение имеющихся теоретических и экспериментальных результатов, посвященных определению этого параметра, проведено в [3, 6]. Представляет интерес выяснение влияния угла соударения на размер пробитого отверстия. Ясно, что при ударе под углом размер отверстия должен увеличиваться в направлении удара, а само отверстие принимать эллиптическую форму. Меньшая ось эллипса a должна при этом оставаться равной диаметру отверстия, пробиваемого в такой же пластине при ударе тела с той же скоростью по нормали к поверхности. Сравнение полученных результатов с данными работы [6], относящихся к удару по нормали при тех же самых остальных условиях, показывает, что величина a действительно совпадает с диаметром такого отверстия.

В качестве первого приближения для большей оси эллипса b из простейших геометрических рассуждений можно принять величину $a/\sin \alpha$. Однако, как показывают результаты экспериментов, в действительности $b \geq a/\sin \alpha$, что, по-видимому, связано с изменением условий нагрузки на края расширяющегося отверстия в случае удара под углом. Результаты опытов приведены на рис. 2 (кривая описывает функцию $a/b = \sin \alpha$). Отличие b от $a/\sin \alpha$ особенно существенно при малых α . При $\alpha = 30^\circ$ площадь образующегося отверстия может более чем в 1,5 раза превышать площадь отверстия, возникшего в тех же условиях при нормальном ударе. Как следует из проведенного сравнения, для определения a можно пользоваться эмпирическими зависимостями из [6].

Рассмотрим результаты измерения скорости осколков, проникающих за пробитый экран. В случае удара по нормали к поверхности экрана принято определять запреградную скорость как максимальную скорость движения потока осколков в направлении удара. При ударе под углом каждая из разделившихся групп осколков будет иметь свою запреградную скорость, понимаемую в смысле приведенного определения. Таким образом, в рассматриваемом случае существуют три характерные ско-

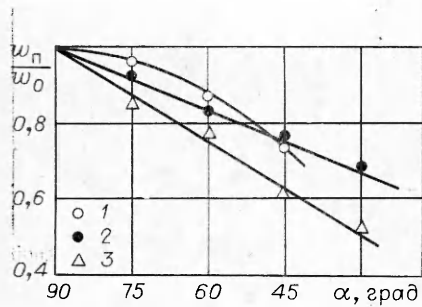


Рис. 4.

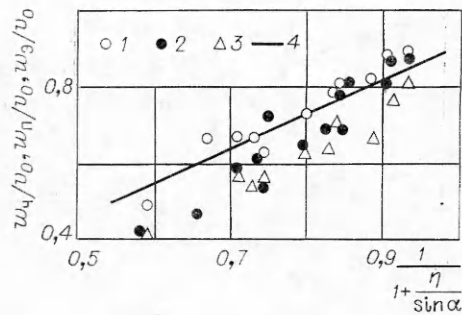


Рис. 5.

рости потока осколков, проникающих на экран: w_n — скорость осколков частицы, w_s — скорость осколков экрана и $w_n = \max(w_s, w_r \sin \alpha)$. Последняя величина наиболее важна с практической точки зрения, так как именно она в соответствии с имеющимися представлениями о механизме образования каверн при ударе высокоскоростных частиц будет при прочих равных условиях определять глубину каверн на мишени. Результаты экспериментов приведены на рис. 3, 4 в виде зависимостей w_n/w_0 , w_s/w_0 , w_n/w_0 от угла соударения. Здесь w_0 — запреградная скорость при $\alpha = 90^\circ$; толщина экрана, мм: 1 — 0,5; 2 — 1; 3 — 2, светлые точки на рис. 3 относятся к w_n/w_0 , темные — w_s/w_0 . Данные показывают, что для всего исследованного диапазона изменения углов удара $w_n < w_s$. Для тонкого экрана превышение w_n над w_s незначительно. Так, в случае $\delta = 0,5$ мм w_n практически совпадает с w_s . Однако с ростом толщины экрана различие увеличивается и при $\delta = 2$ мм $w_n = w_s \sin \alpha$ во всех случаях, кроме $\alpha = 30^\circ$.

При ударе по нормали к поверхности экрана для описания зависимости величины запреградной скорости от параметров, характеризующих условия соударения, берется функция, являющаяся следствием закона сохранения импульса при неупругом соударении,

$$w_0/v_0 \approx k/(1 + \eta).$$

При шаровой форме ударяющего тела $\eta = \delta \rho_1 / 0,875 d_0 \rho_0$, ρ_1 и ρ_0 — плотности материала преграды и шара соответственно, k — эмпирический коэффициент, позволяющий учесть неидеальность явления [1]. Следуя этому подходу, в рассматриваемом случае естественно попытаться использовать в качестве зависимости, описывающей процесс, эту же функцию, формально интерпретируя изменение условий соударения при ударе под углом как увеличение соответствующей удельной (на единицу поверхности) массы преграды. Тогда зависимость принимает вид

$$w_n/v_0 \approx \lambda/(1 + \eta/\sin \alpha), \quad (1)$$

так как результаты экспериментов показали, что именно w_n есть максимальная скорость осколков, проникающих за экран. Ясно, что зависимость ни при каких значениях подгоночного параметра λ не может относиться к запреградной скорости осколков экрана w_s , поскольку она, по-видимому, соответствует главным образом скорости отколовшихся с тыльной поверхности слоев, т. е.

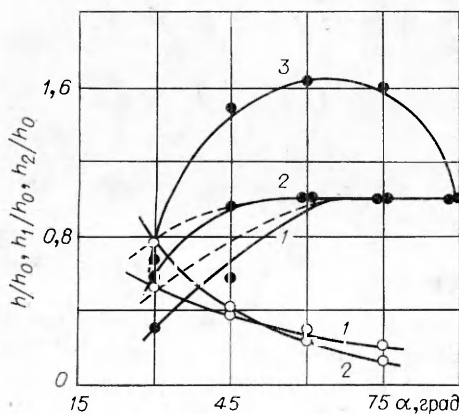


Рис. 6.

физическим процессам, не описываемым законом сохранения импульса в выписанной простейшей форме. Проверка применимости соотношения (1) для описания полученных экспериментальных данных проведена на рис. 5, где 1 — w_1/v_0 , 2 — w_2/v_0 , 3 — w_3/v_0 , 4 — зависимость (1) с $\lambda = k = 0,9$. Анализ рисунка показывает, что действительно, с учетом возможных ошибок эксперимента, (1) может применяться для описания данных о максимальной заградной скорости по крайней мере при $d_0 > \delta$.

Рассмотрим результаты изучения поражения мишени, защищенной экраном, приведенные на рис. 6 в виде зависимостей h/h_0 , h_1/h_0 , h_2/h_0 от угла соударения. Здесь h_0 — глубина максимальной каверны при $\alpha = 90^\circ$, темные точки соответствуют кавернам от осколков частицы, светлые — от осколков экрана. Кривые 1 получены при толщине экрана $\delta = 2$ мм, 2 — $\delta = 1$ мм, 3 — $\delta = 0,5$ мм, штриховыми линиями проведены зависимости для h/h_0 . В случае $\delta = 0,5$ мм каверны от осколков экрана пренебрежимо малы и соответствующие данные в масштабе этого рисунка привести невозможно. Основной особенностью приведенных результатов является качественное различие зависимостей h_1/h_0 (и, следовательно, h/h_0) для $\delta = 0,5$ мм и $\delta = 1$ и 2 мм. Если $\delta = 1$ и 2 мм кривые максимального поражения мишени вначале остаются практически на постоянном уровне, а затем с уменьшением α монотонно убывают, то соответствующая кривая при $\delta = 0,5$ мм с уменьшением α вначале резко возрастает до величины $h > 1,5 h_0$, и только затем, уже при относительно малых значениях α , начинает убывать. Наблюдаемое различие в характере зависимостей свидетельствует о том, что влияние отклонения траектории частицы от нормали к поверхности экрана на процессы, вызываемые ударом и приводящие к разрушению частицы, не может быть сведено к формальному сопоставлению удара по нормали к поверхности при соответствующем увеличении толщины экрана в геометрической пропорции, как это было при обработке результатов измерения заградной скорости.

Действительно, качественные особенности влияния изменения толщины экрана на глубину поражения мишени при $\alpha = 90^\circ$, проанализированные в [2], состоят в том, что при очень тонких экранах глубина максимальной каверны стремится к глубине каверн в полубесконечной мишени. С ростом δ она уменьшается и достигает минимума при некотором определяемом условиями соударения значении δ . Дальнейший рост толщины экрана вызывает увеличение глубины максимальной каверны, продолжающееся до тех пор, пока δ не становится сравнимой с предельно пробиваемой толщиной для данных скорости удара v_0 и материала частицы и экрана. При экранах такой толщины поражение резко падает до нуля. В условиях поставленных экспериментов минимум соответствует значению $\delta/d_0 \approx 0,4 \div 0,5$, и точки, соответствующие выбранным толщинам экранов при изменении δ от 0,5 до 2 мм, расположатся на убывающем участке зависимости, в районе ее минимума и на ее возрастающем участке. О такой расстановке этих точек свидетельствуют и значения h_0 , полученные в экспериментах. Следовательно, если бы влияние угла соударения сводилось к увеличению толщины экрана, то зависимость $h_1(\alpha)$ при $\delta = 0,5$ мм, которая в данном случае целиком совпадает с $h(\alpha)$, с ростом α монотонно убывала бы, тем более, что определяющая глубину каверны скорость w_1 с ростом α падает. Возможно, именно это обстоятельство вызывает в этом случае падение $h(\alpha)$ при $\alpha < 45^\circ$.

Проведенный анализ свидетельствует о существенном изменении механизма процесса в случае удара под углом по сравнению с ударом по нормали к экрану, что и приводит к изменению характера поражения мишени. Качественные различия в характере разрушения частицы при ударе под углом и по нормали видны на рис. 7, где приведены

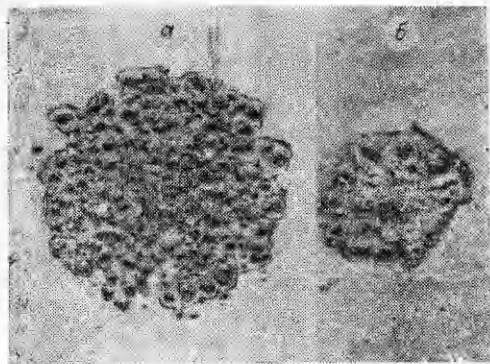


Рис. 7.

фотографии поля каверн на мишени. При $\alpha = 90^\circ$ (см. рис. 7, а) имеется поле отдельных каверн с максимальной каверной в центре, соответствующей неразрушенной центральной части ударяющей частицы. При $\alpha = 75^\circ$ (см. рис. 7, б) образовалась практически одна сплошная каверна с углублением в центре. В этом случае, если даже соударение с экраном и вызывает разрушение частицы, осколки ее летят компактным облаком, хотя расстояние до мишени здесь больше, чем в предыдущем случае, и, следо-

вательно, условия для рассредоточения осколочного облака являются более благоприятными.

Интересно сравнить изменение величин h_1 и h_2 в зависимости от угла удара. Данные, приведенные на рис. 6, показывают, что в то время как h_1 для $\delta = 1$ и 2 мм остается приблизительно постоянной, а затем убывает с уменьшением α , величина h_2 с уменьшением α монотонно возрастает. В обоих случаях, начиная с некоторых значений α , величина h_2 становится больше h_1 и при дальнейшем убывании угла поражение мишени определяется уже осколками экрана. Ясно, что конкретные значения углов, при которых $h_2 \geq h_1$, будут зависеть от условий соударения, в первую очередь, от скорости удара, толщины и материала экрана.

Для описания особенностей осколочных полей в [2] введено понятие структуры поражения мишени. Данные проведенных экспериментов не позволяют сказать, как влияет отклонение траектории частицы от нормали к поверхности экрана на структуру поражения мишени, так как исследования проведены только при одной скорости удара, а структурные диаграммы строятся на плоскости переменных $\delta/d_0, v_0$.

4. Проведенные экспериментальные исследования показали, что параметры отверстия, пробиваемого высокоскоростной частицей в тонкой преграде при ударе под углом к ее поверхности, не могут быть определены на основе простейших геометрических соображений. При разделении потоков осколков частицы и экрана можно выделить три характерные скорости осколков. Максимальная из этих скоростей — скорость осколков частицы — может быть связана с параметрами, характеризующими соударение, с помощью закона сохранения импульса. Результаты опытов позволили установить важный как в теоретическом, так и в практическом плане факт: при ударе под углом к поверхности экрана, отличном от 90° , принципиально меняется механизм разрушения частицы. Это приводит к существенным количественным изменениям характеристик поражения мишени и делает невозможным прямое обобщение на случай удара под углом данных, полученных при ударе по нормали. Явление нуждается в дальнейшем теоретическом и экспериментальном изучении.

Авторы благодарны Б. Д. Коробко за помощь в обработке результатов экспериментов.

Поступила в редакцию
29/II 1980

ЛИТЕРАТУРА

1. Л. А. Мерзиевский, В. М. Титов. ПМТФ, 1975, 5.
2. Л. А. Мерзиевский, В. М. Титов. ПМТФ, 1977, 2.
3. Высокоскоростные ударные явления. М., Мир, 1973.
4. В. М. Титов, Ю. И. Фадеевко, Н. С. Титова. Докл. АН СССР, 1968, 180, 5.
5. H. F. Swift, D. D. Preonas, W. C. Turpin. J. Spac. Res., 1970, 7, 3.
6. Л. А. Мерзиевский, Ю. И. Фадеевко. Космические исследования, 1973, XI, 6.

НАГРУЗКИ, ВОЗНИКАЮЩИЕ ПРИ ВЗРЫВАХ В ВОЗДУХОПОЛНЕННОЙ ВЗРЫВНОЙ КАМЕРЕ

А. А. Бузуков
(Новосибирск)

В работе [1] показано, что при взрывах шпуровых зарядов ВВ в воздухополненной взрывной камере цилиндрической формы ее стенки совершают сложное колебательные движения. Наряду с начальной реакцией на действие ударной волны корпус камеры через несколько миллисекунд вновь начинает интенсивно деформироваться, причем амплитуда этих колебаний, как правило, существенно превышает первоначальную и может достигать опасных значений, вызывая механическую перегрузку конструкции. Причина появления такой вторичной деформации «раскачки» усматривалась в развитии резонансных явлений при сложении продольных и радиальных колебаний корпуса по нескольким гармоникам.

В [1] приведена также схема расчета амплитуды первичной радиальной деформации стенки камеры при действии на нее ударной волны от взрыва линейного заряда ВВ с использованием известных из литературы [2] эмпирических соотношений, описывающих газодинамические параметры ударной волны. Сравнение расчетных и экспериментальных значений относительной радиальной деформации для данной конструкции камеры показало, что если для зарядов ВВ весом до 25 г/м (1—2 нити детонирующего шнура в связке) наблюдается удовлетворительное согласие, то при взрыве более мощных зарядов измеренные значения деформации оказались на 20—40% ниже расчетных. Предполагалось, что это расхождение связано с рассредоточением заряда при соединении в связку нескольких нитей детонирующего шнура, уменьшением эффективной плотности заряда и соответствующим снижением параметров ударной волны [3].

Для выяснения причин появления деформации раскачки, а также причины расхождения экспериментальных и расчетных значений начальной деформации в случае взрыва мощных линейных зарядов ВВ проведена дополнительная серия экспериментов, в которой наряду с измерениями деформаций стенок взрывной камеры производилась запись эпюры давления в падающих на стенку ударных волнах, а также статического давления в камере, устанавливающегося после взрыва.

Описанию результатов этих экспериментов посвящена настоящая статья. Полученные данные могут оказаться полезными при разработке взрывных камер различных конструкций.

Методика эксперимента. Конструкция экспериментального стенда подробно описана в [1]. В настоящей серии опытов в камере производились взрывы связок нитей детонирующего шнура ДШ-А (10—11 г тэна на погонный метр) длиной два метра [4]. Заряды ВВ подвешивались по оси взрывной камеры, представлявшей собой цилиндрическую емкость длиной 2500, диаметром 800 и с толщиной стенок 10 мм.