

ДИНАМИЧЕСКАЯ АНТИКУМУЛЯТИВНАЯ ЗАЩИТА

Б. В. Войцеховский, В. Л. Истомин

Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, 630090 Новосибирск

Теоретически и экспериментально исследованы характеристики динамической защиты, антикумулятивный слой которой состоит из двух металлических пластин со слоем взрывчатого вещества между ними. Получены зависимости глубины проникания струи при прохождении ее через антикумулятивный слой от угла их взаимодействия и толщины слоя взрывчатого вещества.

Принятые на вооружение современные средства поражения бронемашин, особенно кумулятивные, способны пробивать однородную броню значительной толщины (600 мм и более). Пассивными методами обеспечить защиту бронемашин практически невозможно. Поэтому для этой цели необходимо использовать внешние источники энергии. Одним из таких источников является взрывчатое вещество (ВВ).

При взаимодействии с кумулятивной струей ВВ инициируется, в результате чего глубина проникания кумулятивной струи в преграду уменьшается по сравнению со значением, рассчитанным по гидродинамической теории кумуляции [1]. Но для существенного уменьшения глубины проникания кумулятивной струи в преграду требуется значительное количество ВВ.

Механизм динамической антикумулятивной защиты обоснован теоретически, подтвержден опытами и состоит в разрушении кумулятивной струи (в дальнейшем называемой струей) с помощью металлических пластин, пересекающих траекторию струи с большой скоростью. Для сообщения скорости пластинам применяется, как правило, плоский заряд ВВ, который инициируется самой струей. Таким образом, в динамической защите ВВ играет не основную, а вспомогательную роль — источника энергии. С помощью динамической антикумулятивной защиты можно добиться практически полного уничтожения кумулятивной струи.

В данной статье излагаются результаты исследований динамической антикумулятивной защиты, выполненных в 1957–1961 гг.

ТЕОРИЯ МЕТОДА

На рис. 1 представлены кумулятивный заряд и преграда, между которыми расположена система, состоящая из двух плоских металлических пластин и тонкого слоя ВВ между ними. В дальнейшем такую систему или подобную ей будем называть антикумулятивным слоем. Нормаль к поверхности слоя составляет угол α с направлением движения струи.

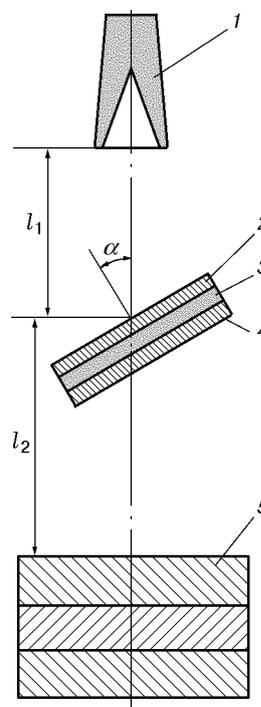


Рис. 1. Взаимное расположение кумулятивного заряда, антикумулятивного слоя и преграды:

1 — кумулятивный заряд, 2, 4 — металлические пластины, 3 — слой ВВ, 5 — преграда

Струя, образуемая из данного заряда, пересекает на своем пути антикумулятивный слой и инициирует в нем ВВ. Почти вся выделяющаяся при взрыве энергия переходит в кинетическую энергию металлических пластин, которые, двигаясь под некоторым углом к струе, сообщают ей импульс, под действием которого она разрушается.

Эксперименты, проведенные по описанной выше схеме, показывают, что при $\alpha \neq 0$ глубина проникания струи в преграду меньше, чем в отсутствие антикумулятивного слоя. При $\alpha = 0$ она остается практически неизменной. На рис. 1 показана наиболее простая модель динамической антикумулятивной защиты. Поэтому она и подверглась в первую очередь экспериментальной проверке, и на ней были выявлены наиболее характерные черты процесса.

В гидродинамической теории кумуляции образование струи из оболочки и ее проникание в преграду рассматриваются как движение и соударение струй идеальной несжимаемой жидкости [1]. Мы аналогично будем рассматривать и взаимодействие струи с пластинами антикумулятивного слоя при следующих предположениях:

— ВВ детонирует мгновенно, и разлет пластин происходит с постоянными скоростями с момента детонации;

— взаимодействие струи и пластин неупругое;

— ширина участка пластины, действующего на струю, равна величине ее диаметра.

Струя разрушается быстро движущимися пластинами за счет двух основных процессов:

— деформации ее поперечного сечения, т. е. распыление струи идет до такой степени, что она становится не способной пробивать преграду;

— бокового смещения струи под действием пластины, которое ведет к тому, что энергия струи тратится на расширение отверстия в мишени, а не на углубление каверны в преграде.

Последний механизм изучался в работах [2, 3], однако в экспериментах входное отверстие очень редко бывает не круглым. Это означает, что хвост струи мало отклоняется от начального направления движения или он практически успевает за время движения распылиться.

Рентгенограммы соударения реальных струй с антикумулятивным слоем (например,



Рис. 2. Рентгенограмма взаимодействия струи с антикумулятивным слоем

на рис. 2, где хорошо видно расположение пластин и струи) и кинограммы, полученные в модельных экспериментах на водяных струях, показывают, что отклонение струи от первоначального направления очень незначительное, но зато на них хорошо заметна деформация поперечного сечения. Поэтому было сделано предположение, что основным процессом разрушения струи является распыление.

В этом случае задачу можно свести к нахождению пространственного течения идеальной несжимаемой жидкости. Проведем этот расчет для стационарного течения. Если при рассмотрении процесса соударения струи с пластиной перейти в систему координат, движущуюся со струей, то можно легко получить соотношение между длиной пластины L и участком струи a , с которым эта пластина взаимодействует:

$$a = \frac{L}{\sin \alpha} \left(\frac{v_c}{v_n} \cos \alpha \pm 1 \right)$$

(v_c, v_n — скорости струи и пластины соответственно). Отсюда нормальная составляющая импульса, получаемая струей на единицу длину, равна

$$P_n = \frac{\rho_c d \delta v_n \sin^2 \alpha}{(v_c/v_n) \cos \alpha \pm 1}, \quad (1)$$

где ρ_c — плотность струи, δ — ее диаметр, d — толщина пластины. Для того чтобы полу-

чить картину деформации поперечного сечения струи, нужно найти распределение скоростей различных точек этого сечения.

Предполагая, что течение потенциально, эту задачу можно свести к решению задачи Дирихле для круга со следующими граничными условиями [4]:

$$\Phi_0 = \begin{cases} (P_n/\delta\rho_c) \cos \psi & \text{при } -\pi/2 \leq \psi \leq \pi/2, \\ 0 & \text{при } \pi/2 \leq \psi \leq 3\pi/2. \end{cases}$$

Решение ее дается интегралом Пуассона, после вычисления которого в полярных координатах и дифференцирования Φ по координате r получим, переходя к пределу ($r \rightarrow 1$), значение радиальной скорости и ее составляющих на границе:

$$v_r = v_{r,1} + v_{r,2} + v_{r,3},$$

$$v_{r,1} = -k(\pi + 2 \cos \psi) \cos 2\psi, \quad (2)$$

$$v_{r,2} = -k \cos^2 \psi \left[\operatorname{ctg} \left(\frac{\pi}{2} - \frac{\psi}{2} \right) - \operatorname{ctg} \left(-\frac{\pi}{2} - \frac{\psi}{2} \right) \right],$$

$$v_{r,3} = -k \sin 2\psi \left(2 \sin \psi + \ln \frac{1 - \sin \psi}{1 + \sin \psi} \right).$$

Аналогично для тангенциальной скорости v_ψ на границе имеем

$$v_\psi = \begin{cases} 2\pi k \sin 2\psi & \text{при } -\pi/2 \leq \psi \leq \pi/2, \\ 0 & \text{при } \pi/2 \leq \psi \leq 3\pi/2, \end{cases}$$

где $k = P_n/2\pi\delta\rho_c$.

Будем полагать, что данное сечение струи теряет способность проникать в преграду по истечении времени t , отсчитываемого от момента получения импульса от пластины до момента соединения противоположных точек, одна из которых является точкой соприкосновения струи и пластины. Это время может быть рассчитано из соотношения

$$t = \delta/(v_0 - v_\pi),$$

где v_0 — скорость точки соприкосновения струи и пластины, v_π — скорость противоположной точки. В этом случае глубина проникания струи вычисляется следующим образом:

1) определяется расстояние, которое участок струи пройдет за время t со скоростью v_c :

$$S = \frac{v_c}{v_0 - v_\pi} \delta;$$

2) находятся элементы струи, которые к моменту взаимодействия с преградой теряют способность пробивать;

3) для получения глубины проникания это расстояние сравнивается с тем, которое данный участок струи пройдет к моменту взаимодействия с преградой.

Таким образом, глубина проникания будет складываться из глубины проникания элементов струи, не расплывшихся к этому моменту.

Из вышеизложенного ясно, что этот расчет применим как для безградиентной (по скорости) струи, так и для имеющей градиент вдоль своей длины. Отметим также, что в последующих вычислениях нами учитывалось растяжение струи за счет градиента скорости.

Скорость металлической пластины v_n , входящую в выражение для импульса (1), можно определить из законов сохранения энергии и импульса или при использовании методов, изложенных, например, в [5].

Хотя эта схема взаимодействия струи с антикумулятивным слоем не учитывает ряд явлений (например, конечность скорости детонации ВВ, влияние продуктов взрыва на струю), однако, как будет показано ниже, результаты расчетов по ней достаточно хорошо совпадают с экспериментальными данными.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ. СРАВНЕНИЕ С РАСЧЕТОМ

Эксперименты проводились по схеме, представленной на рис. 1. Использовались кумулятивные заряды со стальными конусами (диаметр основания конуса 70 мм, угол раствора 26°). В качестве ВВ взят сплав тротила с гексогеном в массовом соотношении 1 : 1. Глубина проникания струи h_0 от таких зарядов в преграду составляла 260 мм при расстоянии между зарядом и преградой $140 \div 200$ мм.

По средним результатам экспериментов были построены зависимости глубины проникания струи h в преграду от угла α и от толщины металлических пластин и слоя ВВ после взаимодействия преграды с антикумулятивным слоем.

На рис. 3 приведены экспериментальная и расчетная зависимости глубины проникания струи от угла α для антикумулятивного слоя, в котором обе пластины толщиной 2,5 мм каждая выполнены из алюминия, а толщина слоя ВВ между ними равнялась 4 мм при $l_1 = l_2 =$

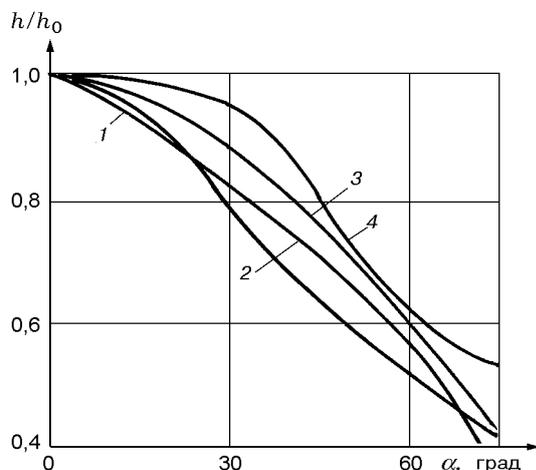


Рис. 3. Зависимость глубины проникания струи в преграду от угла α :

1, 3 — эксперимент, 2, 4 — расчет; 1, 2 — обе пластины алюминиевые, толщина каждой 2,5 мм, 3, 4 — нижняя пластина заменена стальной толщиной 50 мм, в обоих случаях толщина ВВ 4 мм, $l_1 = l_2 = 70$ мм

70 мм (см. рис. 1). На рис. 3 приведены также аналогичные зависимости для антикумулятивного слоя, в котором нижняя пластина из алюминия заменена стальной толщиной 50 мм.

Кривые на рис. 3 показывают, что с ростом угла α уменьшается глубина проникания струи в преграду. Это связано с увеличением импульса, передаваемого струе пластинами, поэтому ее распыление идет быстрее. Значительное увеличение массы нижней пластины, как и следовало ожидать, ведет к увеличению глубины проникания струи. Полученные расчетные кривые весьма близки к экспериментальным.

Влияние толщины слоя ВВ показано на рис. 4 на примере антикумулятивного слоя с двумя алюминиевыми пластинами ($l_1 = 120$ мм, $l_2 = 80$ мм) для углов $\alpha = 45^\circ$ и 60° . Поведение теоретических кривых вполне аналогично экспериментальным. Видно, что при достижении толщины слоя ВВ 7 мм наступает «насыщение», т. е. глубина проникания струи в преграду практически прерастает уменьшаться.

Отметим, что, если в антикумулятивном слое металлические пластины отсутствуют, глубина проникания струи в преграду также уменьшается, однако воздействие такого слоя на струю значительно слабее.

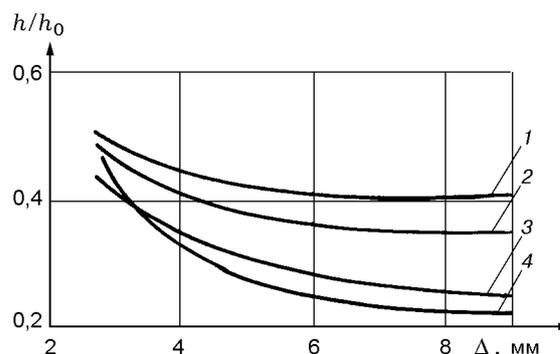


Рис. 4. Зависимость глубины проникания струи в преграду от толщины слоя ВВ:

1, 3 — расчет, 2, 4 — эксперимент; 1, 2 — $\alpha = 45^\circ$, 3, 4 — $\alpha = 60^\circ$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные теоретические исследования позволили обосновать, а эксперименты подтвердили возможность разрушения кумулятивной струи движущимися металлическими пластинами. Эти исследования показали высокую эффективность динамической антикумулятивной защиты.

Одновременно в работе дан анализ разрушения струи и предложена схема расчета глубины проникания кумулятивной струи после взаимодействия с антикумулятивным слоем, состоящим из двух металлических пластин и взрывчатого вещества между ними.

В заключение авторы выражают благодарность М. И. Воротниковой за участие в экспериментах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лаврентьев М. А. Кумулятивный заряд и принципы его работы // Успехи мат. наук. 1957. Т. 12, № 4. С. 41–56.
2. Jadan H. S. Interaction of a metallic jet with a moving target // Prop., Expl., Pyrotechn. 1988. V. 13. P. 74–79.
3. Jadan H. S. Effect of moving plate on jet-penetration // Prop., Expl., Pyrotechn. 1989. V. 14. P. 12–18.
4. Лаврентьев М. А., Шабат Б. В. Методы теории функций комплексного переменного. М.: Физматгиз, 1958.
5. Физика взрыва / Ф. А. Баум, Л. П. Орленко, К. П. Станюкович, Р. П. Чельшев, Б. И. Шехтер. М.: Наука, 1975.