

УДК 623.483.3+623.562.7

## ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ КУМУЛЯТИВНОЙ СТРУИ С ДВИЖУЩИМИСЯ ПЛАСТИНАМИ ДИНАМИЧЕСКОЙ ЗАЩИТЫ

И. Ф. Кобылкин<sup>1</sup>, Н. С. Дорохов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, 105005 Москва  
kobylikin\_ivan@mail.ru

<sup>2</sup>Научно-исследовательский институт стали, 127411 Москва

Рассмотрены механизмы стационарного и нестационарного взаимодействия металлической кумулятивной струи с лицевой (движущейся навстречу струе) и тыльной (движущейся вдогон струе) пластинами динамической защиты. Определен диапазон параметров взаимодействия, при которых реализуются эти механизмы. Показано, что взаимодействие кумулятивной струи с лицевой пластиной имеет в основном стационарный характер и приводит к срабатыванию струи в поперечном направлении (уменьшению диаметра струи) и отклонению ее на небольшой угол. Взаимодействие кумулятивной струи с тыльной пластиной имеет в основном нестационарный дискретный характер и формирует в струе односторонние поперечные возмущения, которые, развиваясь, приводят к ее искривлению и последующему разрушению.

Ключевые слова: кумулятивная струя, динамическая защита, непрерывное и дискретное взаимодействие, срабатывание и отклонение струи, поперечные волнообразные возмущения струи.

### ВВЕДЕНИЕ

Научная история динамической защиты бронетехники от воздействия кумулятивных средств поражения началась более 50 лет назад, когда Б. В. Войцеховский, В. Л. Истомина (МФТИ), А. И. Платов (НИИ стали) и другие под руководством М. А. Лаврентьева провели первые эксперименты по исследованию динамической противокумулятивной защиты [1, 2]. В настоящее время уже нет альтернативы использованию динамической защиты бронетехники от действия бронебойных и кумулятивных средств поражения.

Основой взрывной динамической защиты являются плоские элементы, состоящие из двух металлических пластин и заключенного между ними слоя ВВ. Детонация слоя ВВ осуществляется под воздействием кумулятивной струи (КС). Образующиеся продукты детонации ускоряют пластины, которые воздействуют под углом на КС. Это приводит к отклонению, разрушению или срабатыванию КС, вследствие чего существенно уменьшается глубина пробития основной части преграды, расположенной за устройством динамической защиты. Несмотря на простоту конструкции большинства таких устройств, физика ее функционирования весьма сложна и до настоящего

времени не все процессы, определяющие ее защищающую способность, изучены полностью. Настоящая статья посвящена изучению динамики соударения КС с лицевой (летящей навстречу КС) и тыльной (летящей вдогон КС) пластинами динамической защиты.

В работе [2] предполагалось стационарное непрерывное взаимодействие КС с пластинами динамической защиты в рамках модели идеальной несжимаемой жидкости. Несмотря на то, что построенная в [2] расчетная модель процесса адекватно отражала результаты экспериментов, заложенный в ее основу механизм взаимодействия КС с пластинами защиты не в полной мере соответствует действительности. В настоящее время в качестве основного рассматривается нестационарный механизм взаимодействия, в основе которого лежит периодическое взаимодействие КС с относительно тонкими (толщиной несколько миллиметров) металлическими пластинами защиты [1–5]. Удар высокоскоростного головного элемента КС пробивает в пластине отверстие, диаметр которого превосходит диаметр КС и определяется скоростью КС, прочностью материала пластины и ее толщиной. Движение пластины под углом к КС навстречу или вдогон КС вновь приводит к ударному контакту края отверстия в пластине с боковой поверхностью следующего элемента КС, в результате чего элемент КС

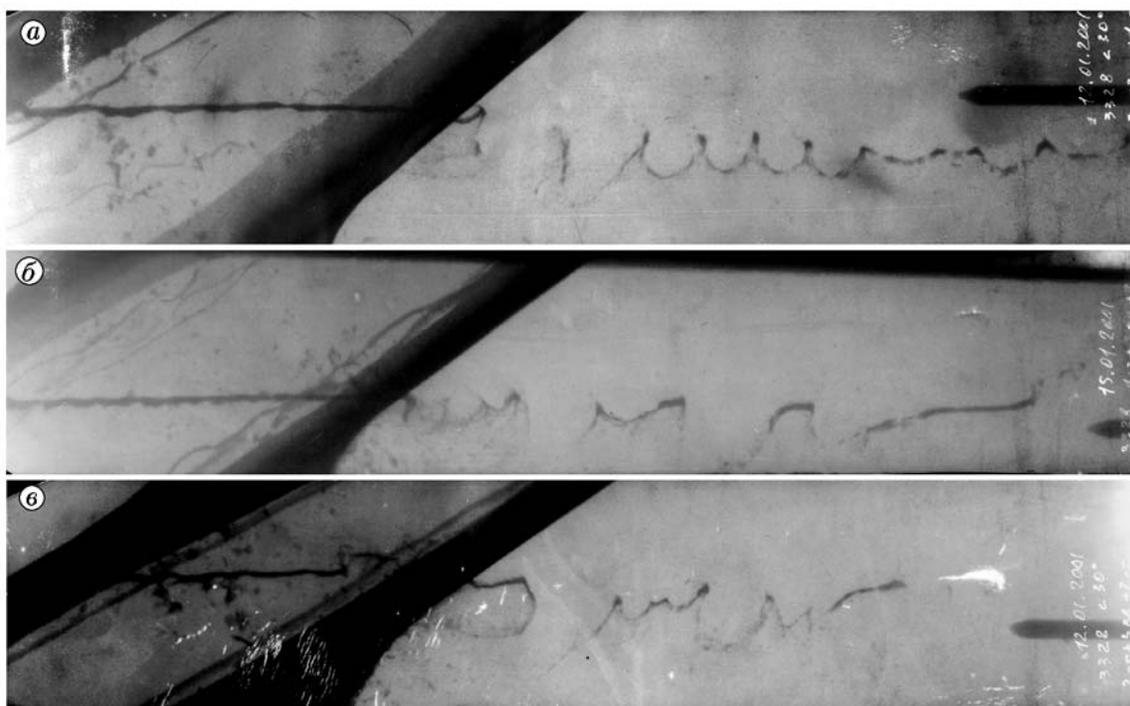


Рис. 1. Рентгенограммы взаимодействия медных КС с элементами динамической защиты:

*a* — толщина лицевой пластины 2 мм, тыльной — 1 мм, репер установлен на расстоянии 190 мм от элемента; *б* — толщина лицевой пластины 1 мм, тыльной — 2 мм, репер на расстоянии 220 мм от элемента; *в* — толщина лицевой и тыльной пластин 2 мм, репер на расстоянии 180 мм от элемента; толщина слоя ВВ 3 мм; угол между КС и элементом защиты  $30^\circ$

частично (или полностью) срабатывается, получает боковой импульс и смещается в поперечном направлении, а в пластине вновь формируется эллиптическое отверстие с большим, чем у КС, диаметром. В последующие моменты времени процесс повторяется, в результате КС получает периодические, нарастающие со временем поперечные возмущения.

Описанный процесс подтверждается рентгенограммами взаимодействия КС с элементами динамической защиты. На рис. 1 приведены соответствующие рентгенограммы. Две стальные пластины из малоуглеродистой стали располагались под углом  $30^\circ$  к направлению воздействия КС. Между ними размещался слой ВВ из эластичного взрывчатого состава на основе тэна толщиной 3 мм. Толщина пластин в разных опытах составляла 1 и 2 мм. В качестве кумулятивных использовались лабораторные заряды флегматизированного гексогена плотностью  $1.65 \text{ г/см}^3$ , диаметром 56 мм, с медной конической облицовкой с углом раствора конуса  $50^\circ$ . Глубина пробития преграды из гомогенной броневого стали

этим кумулятивными зарядами при их установке на расстоянии 150 мм от преграды составляла  $238 \pm 13 \text{ мм}$ , скорость головных элементов КС —  $8000 \pm 250 \text{ м/с}$ , диаметр головных элементов полностью вытянутой КС —  $1.9 \pm 0.1 \text{ мм}$ . Как видно из рентгенограмм, состояние КС после прохождения элемента защиты зависит от толщины пластин и порядка их расположения и свидетельствует о периодическом взаимодействии КС с пластинами.

Исходя из того, что пластины динамической защиты разлетаются в противоположных направлениях, можно было ожидать, что они будут создавать в КС поперечные возмущения также в противоположных направлениях. Однако на большинстве рентгенограмм процесса присутствуют возмущения лишь от действия тыльной пластины (см. рис. 1).

В работе [6] этот эффект был объяснен своеобразным «фильтрующим» действием тыльной пластины. Объяснение становится понятным из рис. 2. Поперечные возмущения КС, создаваемые взаимодействием с лицевой пластиной, срезаются при пересечении тыльной

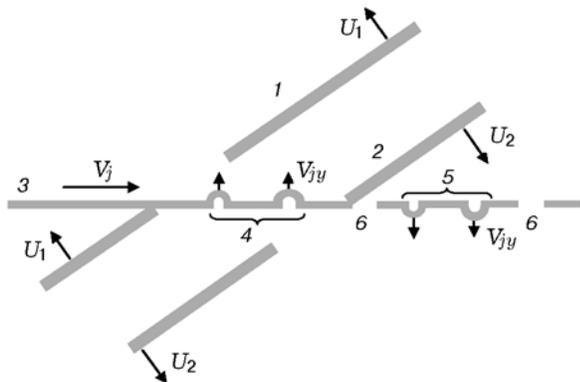


Рис. 2. Прохождение кумулятивной струи через разлетающиеся пластины динамической защиты по [6]:

1, 2 — лицевая и тыльная пластины защиты, 3 — кумулятивная струя, 4, 5 — поперечные возмущения в КС, созданные воздействием лицевой и тыльной пластин соответственно, 6 — разрывы КС, образовавшиеся в результате срезания тыльной пластиной возмущений в КС от воздействия лицевой пластины

пластины, и на выходе из устройства динамической защиты остаются только поперечные возмущения одного направления, образованные в результате взаимодействия КС с тыльной пластиной. Если это так, то воздействие лицевой пластины на КС частично уменьшает эффективность действия тыльной пластины, поскольку приводит к дополнительному расходованию ее материала на срезание поперечных возмущений в КС, вызванных действием лицевой пластины.

Однако при внимательном анализе рентгенограмм предложенный в [6] механизм «фильтрующего» действия тыльной пластины не находит подтверждения, поскольку при прохождении высокоскоростной части КС через лицевую пластину в КС не обнаружены развитые поперечные возмущения не только на наших рентгенограммах (рис. 1), но и на рентгенограмме из статьи [6] и протонограмме из работы [7]. Для того чтобы понять этот эффект, необходимо проанализировать динамику взаимодействия КС с лицевой и тыльной пластинами защиты. Будем исходить из того, что КС передаются только перпендикулярные к ней составляющие импульса тех участков пластин, которые претерпели взаимодействие с КС.

Пусть на элемент КС диаметром  $d_j$ , движущийся со скоростью  $V_j$ , оказывает воздействие пластина защиты толщиной  $\delta_i$  ( $i$  — но-

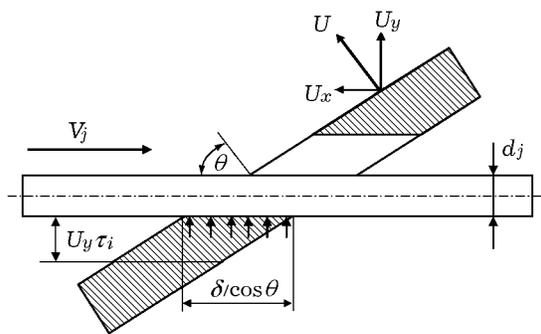


Рис. 3. Схема взаимодействия элемента КС с лицевой пластиной динамической защиты

мер пластины,  $i = 1$  — лицевая пластина,  $i = 2$  — тыльная пластина). Обозначим через  $\theta$  угол между КС и нормалью к поверхности пластины. Будем также считать, что вектор скорости пластины  $U$  направлен по нормали к поверхности пластины. Возможная схема взаимодействия КС с пластиной приведена на рис. 3.

Направим ось  $x$  вдоль, а ось  $y$  перпендикулярно КС. Тогда составляющая скорости пластины вдоль КС  $U_x$  и перпендикулярная ей  $U_y$  по модулю равны  $U_x = U \cos \theta$  и  $U_y = U \sin \theta$ . Обозначим через  $\tau$  характерное время взаимодействия элемента КС с пластиной. В качестве  $\tau$  можно принять, например, время двойного пробега волны сжатия по поперечному сечению КС  $\tau = 2d_j/c_j$  ( $c_j$  — скорость звука в материале КС) или же время нахождения элемента КС в контакте с пластиной:

$$\tau_i = \frac{\delta}{V_{ji} \cos \theta},$$

где  $V_{ji} = V_j - (-1)^i U / \cos \theta$  — фазовая скорость перемещения вдоль КС поверхности контакта КС с пластиной. За время  $\tau_i$  в поперечном направлении со струей вступит во взаимодействие участок пластины (см. рис. 3) высотой  $U_y \tau_i$ , длиной  $\delta / \cos \theta$  и шириной  $\alpha d_j$ , где  $\alpha$  — коэффициент, учитывающий увеличение диаметра КС в процессе взаимодействия. Перпендикулярная к КС составляющая импульса  $I_{yi}$  этого участка пластины может быть определена с помощью соотношения

$$I_{yi} = \rho_{pl} \alpha d_j \frac{\delta}{\cos \theta} U_y \tau_i U_y,$$

где  $\rho_{pl}$  — плотность материала пластины. Необходимо отметить, что для симметричного элемента динамической защиты ( $U_1 = U_2$ )

поперечные импульсы, передаваемые КС лицевой и тыльной пластинами, равны по модулю  $I_{y1} = I_{y2}$  и противоположны по направлению. Но массы элементов КС  $m_{ji}$ , воспринимающие этот импульс, зависят от того, какая пластина защиты — лицевая или тыльная — воздействует на КС. Действительно, имеем

$$m_{ji} = \rho_j \frac{\pi d_j^2}{4} V_{ji} \tau_i,$$

где  $\rho_j$  — плотность материала КС. Поскольку  $V_{j1} > V_{j2}$ , то с лицевой пластиной взаимодействует элемент КС большей массы, а следовательно, и большей длины, чем с тыльной, т. е.  $m_{j1} > m_{j2}$ .

В результате поглощения импульса  $I_{yi}$  элемент КС приобретает поперечную скорость, равную

$$V_{jyi} = \frac{I_{yi}}{m_{ji}} = \frac{4 \rho_{pl} \varpi \delta_i}{\pi \rho_j d_j \cos \theta} \frac{U_{yi}^2}{V_{ji}}.$$

Поскольку  $m_{j1} > m_{j2}$ , то при взаимодействии с симметричным элементом динамической защиты  $I_{y1} = I_{y2}$  поперечная скорость  $V_{jy1}$ , приобретаемая элементом КС при взаимодействии с лицевой пластиной, будет меньше поперечной скорости  $V_{jy2}$ , вызванной взаимодействием с тыльной пластиной. Для того чтобы сделать вывод о характере взаимодействия КС с пластинами защиты, необходимо сравнить поперечные скорости элементов КС  $V_{jyi}$  с нормальными к КС составляющими скоростей пластин  $U_{yi}$ . Если  $U_{yi} \geq V_{jyi}$ , то реализуется непрерывное взаимодействие пластины с КС. Если же  $V_{jyi} > U_{yi}$ , то в КС формируются периодические поперечные возмущения, приводящие к потере контакта КС с пластиной, вследствие чего само взаимодействие будет иметь также периодический характер.

Такие же выводы можно сделать, анализируя отношение скоростей

$$\begin{aligned} \omega_i &= \frac{V_{jyi}}{U_{yi}} = \frac{4 \rho_{pl} \varpi \delta_i}{\pi \rho_j d_j \cos \theta} \frac{U_{yi}}{V_{ji}} = \\ &= \frac{4 \rho_{pl} \varpi \delta}{\pi \rho_j d_j} \frac{U_i}{V_{ji}} \operatorname{tg} \theta. \end{aligned}$$

Если  $\omega_i > 1$ , то элемент КС отскакивает от пластины и в КС образуется характерный поперечный волнообразный изгиб. При  $\omega_i \leq 1$ ,

наоборот, реализуется непрерывное взаимодействие КС с пластиной со срабатыванием и отклонением КС. Равенству  $\omega_i = 1$  соответствует следующее соотношение между скоростью КС  $V_j$ , скоростью пластины  $U_i$ , характеристиками элемента КС и динамической защиты и углом  $\theta$ :

$$\frac{V_j}{U_i} = \frac{4 \rho_{pl} \varpi \delta_i}{\pi \rho_j d_j} \operatorname{tg} \theta + \frac{(-1)^i}{\cos \theta}.$$

Представляет интерес количественно проанализировать это соотношение при следующих значениях входящих в него постоянных:  $\rho_{pl} = 7.8 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>,  $\rho_j = 8.9 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>,  $\theta = 60^\circ$ ,  $\varpi = 1.2$ . В этом случае соотношение принимает вид следующих линейных зависимостей:

$$\frac{V_j}{U_i} = 2.32 \frac{\delta_i}{d_j} \pm 2,$$

где знак плюс берется для тыльной пластины, знак минус — для лицевой. Соответствующие зависимости приведены на рис. 4. Области над прямыми соответствуют стационарным режимам проникания КС через пластины динамической защиты, а области под прямыми — нестационарным. Легко видеть, что через лицевые пластины толщиной  $\delta_1 = (1.5 \div 2)d_j$  КС практически полностью проникает в стационарном режиме, в то время как через тыльные пластины защиты такой же толщины в непрерывном режиме проникает только высокоскоростная часть КС.

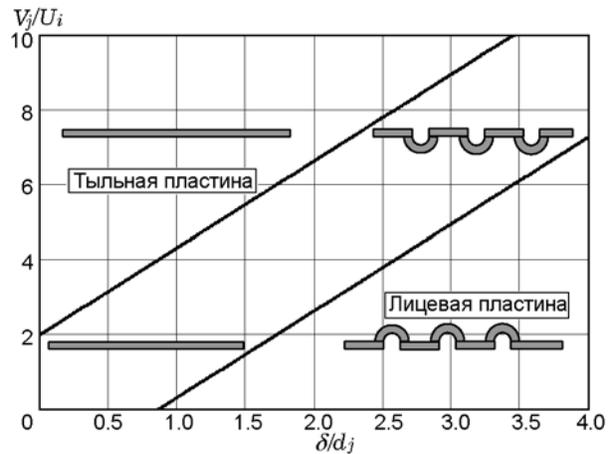


Рис. 4. Области параметров, при которых проникание кумулятивной струи через пластины динамической защиты происходит в стационарном и нестационарном режимах

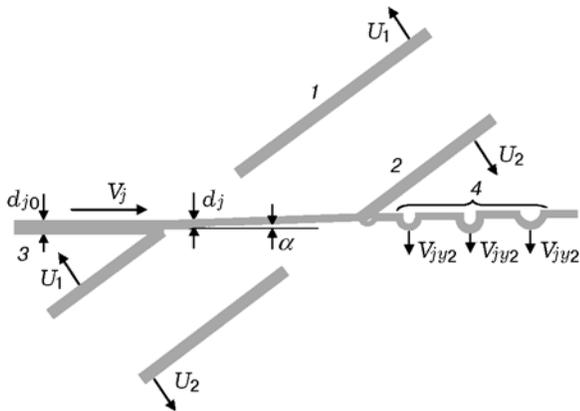


Рис. 5. Схема прохождения кумулятивной струи через разлетающиеся пластины динамической защиты:

1, 2 — лицевая и тыльная пластины защиты, 3 — кумулятивная струя, 4 — поперечные возмущения в КС, образовавшиеся в результате воздействия тыльной пластины

Таким образом, схема прохождения основной части КС через разлетающиеся пластины защиты принимает вид, представленный на рис. 5. Взаимодействие основной части КС с лицевой пластиной имеет непрерывный характер и приводит к некоторому уменьшению ее диаметра (срабатыванию в поперечном направлении) и отклонению на небольшой угол  $\alpha$ . Взаимодействие КС с тыльной пластиной имеет нестационарный, дискретный характер и формирует в КС поперечные возмущения, которые, развиваясь, приводят к ее искривлению и последующему разрушению.

Соотношения для определения угла отклонения КС  $\alpha$  и уменьшения диаметра КС можно найти в [1]. Если предположить, что в процессе взаимодействия КС с лицевой пластиной изменяется только поперечная составляющая импульса КС, то для оценки угла  $\alpha$  не представляет труда получить следующее соотношение:

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \alpha &= \frac{I_{y1}}{m_{j1} V_j} = \\ &= \frac{4 \rho_{pl} \delta_1 \sin^2 \theta}{\pi \rho_j d_j \cos \theta} \left[ \frac{V_j}{U_1} \left( \frac{V_j}{U_1} + \frac{1}{\cos \theta} \right) \right]^{-1}. \end{aligned}$$

Количественный анализ этой зависимости (рис. 6) показывает, что в типичных условиях взаимодействия КС с лицевой пластиной угол  $\alpha$  изменяется в диапазоне  $1 \div 6^\circ$ .

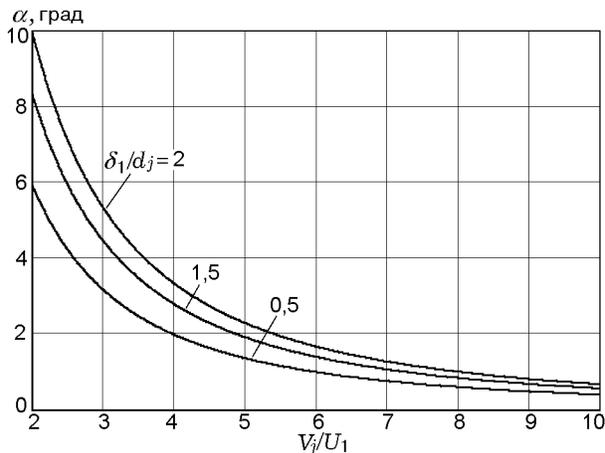


Рис. 6. Зависимость угла отклонения медной КС лицевой стальной пластиной динамической защиты от условий взаимодействия при  $\theta = 60^\circ$

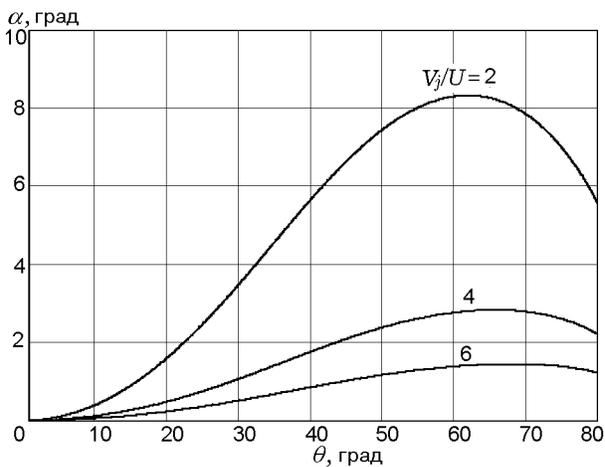


Рис. 7. Зависимость угла отклонения медной КС лицевой стальной пластиной динамической защиты при  $\delta/d_j = 1$  от угла наклона  $\theta$  пластины к КС

Интересно отметить, что зависимость угла отклонения КС  $\alpha$  от угла наклона элемента динамической защиты  $\theta$  не является монотонной (рис. 7). При выбранных параметрах взаимодействия  $\alpha$  достигает максимума при  $\theta = 60 \div 70^\circ$ . Такой характер поведения зависимости  $\alpha(\theta)$  обусловлен тем, что при увеличении  $\theta$  возрастает не только импульс пластины, передаваемый элементу КС, но и масса этого элемента КС.

При нестационарном взаимодействии КС с тыльной пластиной защиты в КС формируются поперечные волны. Для описания эволюции этих волн необходимо задаться механиче-

ской моделью КС. Будем считать КС струной, находящейся в пластическом состоянии, т. е. растянутой постоянной силой  $T = \sigma s$ , где  $\sigma$  — динамический предел текучести материала КС,  $s$  — площадь поперечного сечения КС. В КС возможно распространение двух типов

волн: продольных со скоростью  $c = \sqrt{\frac{1}{\rho_j} \frac{d\sigma}{d\varepsilon}}$  и

поперечных со скоростью  $b = \sqrt{\frac{\sigma}{\rho_j(1+\varepsilon)}}$  ( $\varepsilon$  —

продольная деформация КС перед фронтом поперечной волны) [8, 9]. При хорошо выраженной площадке текучести  $d\sigma/d\varepsilon \rightarrow 0$ , что характерно, например, для меди, скорость продольных волн в КС может быть мала. Оценка скорости поперечных волн дает значение  $b \approx 100$  м/с. Поэтому возникающие в КС поперечные волны локализованы, а их развитие приводит к быстрому разрушению деформированных участков КС.

### ВЫВОДЫ

1. На основе анализа процесса взаимодействия КС с движущимися пластинами динамической защиты оценена величина бокового импульса, передаваемого КС смещающимися под углом пластинами. Основной особенностью взаимодействия КС с динамической защитой является то, что за один и тот же промежуток времени с лицевой пластиной взаимодействует элемент КС большей длины, чем с тыльной.

2. Поскольку поперечная скорость, сообщаемая КС при взаимодействии с лицевой пластиной, меньше перпендикулярной к КС составляющей скорости пластины, то взаимодействие основной части КС с лицевой пластиной имеет непрерывный характер и приводит к срабатыванию КС в поперечном направлении (уменьшению диаметра КС) и к отклонению на небольшой угол  $\alpha$ .

3. При взаимодействии КС с тыльной пластиной приобретаемая КС поперечная скорость превосходит перпендикулярную к КС составляющую скорости пластины, вследствие чего КС периодически отскакивает от пластины и

взаимодействие КС с тыльной пластиной имеет нестационарный дискретный характер и формирует в КС поперечные возмущения, которые, развиваясь, приводят к ее искривлению и последующему разрушению.

4. Возникающие в КС поперечные возмущения можно рассматривать как поперечные волны в струне, находящейся в пластической состоянии. В связи с невысокой скоростью их распространения ( $\approx 100$  м/с) эти волны локализованы, а их развитие приводит к быстрому разрушению деформированных участков КС.

### ЛИТЕРАТУРА

1. **Частные** вопросы конечной баллистики / В. А. Григорян, Н. С. Дорохов, И. Ф. Кобылкин и др. — М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2006.
2. **Войцеховский Б. В., Истомин В. Л.** Динамическая антикумулятивная защита // Физика горения и взрыва. — 2000. — Т. 36, № 6. — С. 87–90.
3. **Mayseless M., Erlich Y., Falcovitz Y., Weihs D., Rosenberg G.** Interaction of shaped charge jets with reactive armor // Proc. 8th Intern. Symp. on Ballistics, Orlando, Florida, 1984. — P. 5–20.
4. **Кобылкин И. Ф., Григорян В. А., Дорохов Н. С., Рототаев Д. А.** Проникание кумулятивных струй через взрывную динамическую защиту // Оборон. техника. — 2002. — № 11. — С. 35–45.
5. **Физика взрыва: в 2 т / под ред. Л. П. Орленко.** — М.: Физматлит, 2002. — Т. 2.
6. **Held M.** Defeating mechanisms of reactive armour sandwiches // Proc. 22nd Intern. Symp. on Ballistics, Vancouver, Canada, 2005.
7. **Свирский О. В., Бурцев В. В., Власова М. А., Михайлов А. Л., Руднев А. В., Сырунин М. А., Ткаченко И. А.** Исследование кумулятивных зарядов методом импульсной протонографии // Экстремальное состояние вещества. Детонация. Ударные волны: тр. междунар. конф. «XIII Харитоновские научные чтения». — Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2011. — С. 624–636.
8. **Сагомоян А.Я.** Волны напряжения в сплошных средах. — М.: Изд-во МГУ, 1985.
9. **Прочность и разрушение при кратковременных нагрузках / Х. А. Рахматуллин, Е. И. Шемякин, Ю. А. Демьянов, А. В. Звягин.** — М.: Унив. кн.; Логос, 2008.

Поступила в редакцию 30/X 2012 г.