

УДК 623.4.082.6

## ПРИЧИНЫ ПРЕКРАЩЕНИЯ ПРОНИКАНИЯ КУМУЛЯТИВНОЙ СТРУИ

М. А. Власова, О. В. Свирский

РФЯЦ, ВНИИ экспериментальной физики, 607180 Саров, postmaster@ifv.vniief.ru

Согласно гидродинамической теории Лаврентьева глубина проникания кумулятивной струи определяется ее полной длиной. Однако, как показывает опыт практического применения кумулятивных зарядов, прекращение проникания обычно наступает раньше, чем струя израсходуется полностью. Для достоверного описания экспериментальных результатов вводятся параметры «эффективная длина» или «эффективная (критическая) скорость» кумулятивной струи, суть которых состоит в исключении из рассмотрения замыкающего участка струи, по различным причинам не участвующего в проникании. Значения эффективной скорости вводятся в расчетные методики как постоянные для конкретной пары материалов струи и преграды или в виде эмпирической зависимости от фокусного расстояния. Рассмотрена возможность разделения струи на эффективный и неработоспособный участки по физически обоснованным причинам без необходимости построения эмпирических зависимостей.

Ключевые слова: кумулятивная струя, эффективная скорость, фокусное расстояние.

DOI 10.15372/FGV2023.9423

EDN QSMTDG

## ВВЕДЕНИЕ

В исследованиях кумулятивных зарядов неоднократно было установлено, что при проникании медных кумулятивных струй в прочные стальные преграды обычно в углублении каверны не принимают участия наименее скоростные замыкающие участки струи. Для характеристики последнего эффективного участка струи вводится понятие эффективной скорости. Эффективная скорость не является константой, характеризующей конкретный заряд, а зависит от условий его применения. Так, например, экспериментально установлено, что эффективная скорость растет с увеличением фокусного расстояния.

Самый простой в реализации способ — это задание эмпирической зависимости эффективной скорости от фокусного расстояния  $W_{eff}(F)$  [1–4]. Ряд таких зависимостей для случая проникания медной струи в броневую сталь приведены на рис. 1. Недостатком такого подхода является необходимость проведения серии испытаний для построения зависимости  $W_{eff}(F)$ , и, как видно из рисунка, для каждой конкретной конструкции заряда диаметром  $CD$  существует своя зависимость.

С физической точки зрения значение эффективной скорости определяется критерием прекращения проникания. Основные причины

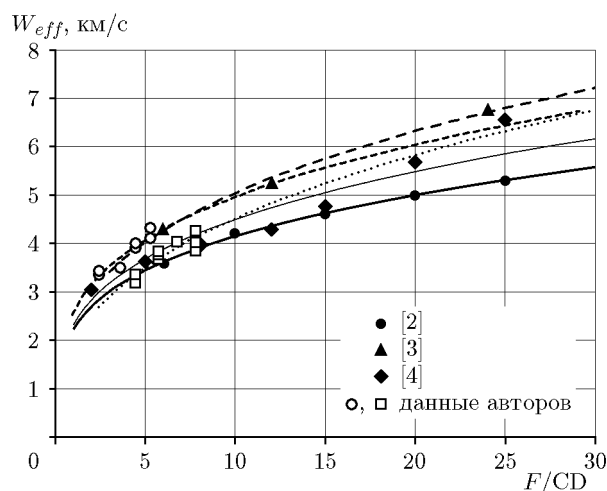


Рис. 1. Зависимость эффективной скорости от фокусного расстояния ( $F$ ) для разных по диаметру ( $CD$ ) и конструкции зарядов

прекращения проникания:

- струя израсходовалась полностью,
- давление, создаваемое струей на дно каверны, стало равным или меньше динамического сопротивления преграды,
- поперечный размер образующейся каверны недостаточен, чтобы материал струи мог беспрепятственно растекаться по стенкам каверны (критерий Сендрея),
- поперечный размер элемента струи больше диаметра каверны в месте ее локально-

го сужения, образованного при проникании предыдущих элементов,

– элементы струи касаются стенок каверны из-за наличия скорости дрейфа.

Рассмотрим возможность реализации этих событий для кумулятивных струй из пластичного металла и порошковой композиции. Следует отметить, что одним из существенных отличий струй из порошковых композиций от струй из пластичных металлов является то, что они представляют собой поток несвязанных частиц, плотность которого снижается при движении струи в свободном пространстве. При взаимодействии с преградой этот поток вновь уплотняется от текущей (на подходе к преграде) плотности  $\rho_{j0}$  до номинальной плотности материала  $\rho_{00}$  [5].

### ПОЛНОЕ РАСХОДОВАНИЕ СТРУИ

Прекращение проникания из-за полного расходования струи может встречаться при проникании в преграды относительно небольшой прочности (например, бетон), а в случае прочных преград (например, стальная броня) это возможно только на небольших фокусных расстояниях (значительно меньше оптимальных). Известно [6, 7], что у зарядов с медными кумулятивными облицовками скорость замыкающего участка струи составляет, как правило, примерно 2 км/с. Из данных рис. 1 следует, что при проникании в броневую сталь струя может израсходоваться полностью только в испытании при фокусном расстоянии менее одного диаметра заряда (CD).

### ДИНАМИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ПРЕГРАДЫ

Как правило, если речь идет о причине прекращения проникания, то рассматривается механизм, связанный с динамическим сопротивлением преграды. Условие прекращения проникания в этом случае следует из обобщенного уравнения Бернулли, которое для пары несжимаемая струя из пластичного металла / преграда имеет вид

$$\frac{\rho_j(W-u)^2}{2} + Y_j = \frac{\rho_t u^2}{2} + R_t, \quad (1)$$

где  $Y_j$  — динамический предел текучести материала струи,  $R_t$  — «динамическое сопротивление прониканию»,  $W$  — скорость элемента струи,  $u$  — скорость проникания элемента

струи,  $\rho_j$  и  $\rho_t$  — плотность материала струи и преграды соответственно. Полагая в (1)  $u = 0$  и пренебрегая прочностью материала струи, получаем выражение для эффективной скорости:

$$W_{eff} = \sqrt{\frac{2R_t}{\rho_j}}.$$

Таким образом, в данном случае  $W_{eff}$  определяется прочностными параметрами преграды и материалом струи. Для броневых сталей значения параметра прочности  $R_t$  составляют  $3 \div 5$  ГПа [8–11]. Тогда значения эффективной скорости для пары материалов медь (струя) / броневая сталь (преграда) должны находиться в пределах  $0.82 \div 1.08$  км/с. Очевидно, что при таких значениях динамическое сопротивление преграды не исключает возможности проникания даже самых низкоскоростных замыкающих участков струи и позволяет ей расходоваться полностью.

Уравнение Бернулли для пары струя из порошковой композиции / преграда имеет вид [12]:

$$\frac{\rho_{j0}(W-u)^2}{2} (1+\phi) = \frac{\rho_t u^2}{2} + R_t,$$

где  $\phi = 1 - \rho_{j0}/\rho_{j00}$ . При этом условие прекращения проникания определяется как

$$W_{eff} = \sqrt{\frac{2R_t}{(1+\phi)\rho_{j0}}}.$$

Для струй из порошковых материалов прекращение проникания из-за динамического сопротивления преграды теоретически возможно и будет определяться степенью разуплотнения конкретной струи в конкретных условиях эксперимента.

Следующие критерии чувствительны к способу вычисления радиуса формируемой каверны, для определения которого используются различные подходы.

1. Наиболее распространенный энергетический подход основан на пропорциональности объема  $V$ , формируемого элементом струи участка каверны, кинетической энергии элемента  $E$ :

$$E = A_W V, \quad (2)$$

где  $A_W$  — удельная энергия, необходимая для вытеснения единицы объема материала преграды.

Из (2) следует

$$r_c = r_j W_j \sqrt{\frac{\rho_j}{2A_W}} \sqrt{\frac{1-\alpha}{\alpha}}, \quad (3)$$

где  $\alpha$  — относительная скорость проникания  $u/W$ ,  $r_c$  — радиус каверны,  $r_j$  — радиус элемента струи.

2. Модель Хельда — Сендрей [11, 13–15] рассматривает давление, действующее на боковые стенки каверны, и позволяет получить зависимость радиуса каверны от времени. Максимальный радиус каверны

$$r_c = r_j W_j \sqrt{\frac{\rho_j}{2R_{t(R)}}} (1-\alpha), \quad (4)$$

где  $R_{t(R)}$  — динамическое сопротивление материала преграды поперечному движению (по величине близко к значению статического предела текучести материала [11, 14]).

3. Из формул (3) и (4) видно, что максимальный радиус формируемой каверны пропорционален произведению радиуса и скорости струи. Поэтому может использоваться более простая зависимость [16]:

$$r_c = C r_j W_j, \quad (5)$$

где  $C$  — коэффициент пропорциональности, который может быть определен, в частности, экспериментально.

### КРИТЕРИЙ СЕНДРЕЯ ДЛЯ ПРОНИКАНИЯ СПЛОШНОЙ СТРУИ [11]

Гидродинамический режим проникания требует образования каверны с поперечными размерами, достаточными для вытекания материала струи из области контакта с преградой в обратном направлении. Соответствующее минимальное значение радиуса каверны составляет

$$r_c^{min} = r_j \sqrt{1 + \frac{dL}{dP}} = \frac{r_j}{\sqrt{\alpha}}.$$

В случае, когда радиус формирующейся каверны меньше  $r_c^{min}$ , материал последнего эффективного участка струи, оставаясь на стенках каверны, препятствует свободному прохождению следующего участка, и дно каверны полностью заполняется отработанным материалом.

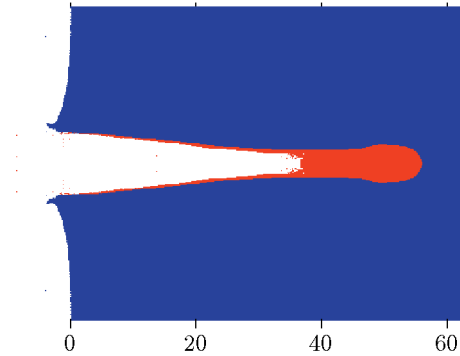


Рис. 2. Расчетная картина прекращения проникания

Расчетная картина прекращения проникания по критерию Сендрей приведена на рис. 2. Рассматривалось проникание медного стержня с линейно распределенной скоростью вдоль оси от 3 до 1 км/с в стальную преграду ( $Y_t = 1.1$  ГПа).

В зависимости от принятой модели расчета радиуса струи скорость, при которой происходит закупоривание каверны, в неявном виде определяется по следующим формулам:

$$\text{для } r_c \text{ из (3)} \quad W_{eff} = \sqrt{\frac{2A_W}{\rho_j(1-\alpha)}}; \quad (6)$$

$$\text{для } r_c \text{ из (4)} \quad W_{eff} = \sqrt{\frac{2R_{t(R)}}{\rho_j\alpha(1-\alpha)^2}}; \quad (7)$$

$$\text{для } r_c \text{ из (5)} \quad W_{eff} = \frac{1}{C\sqrt{\alpha}}. \quad (8)$$

Исходя из рекомендованных значений удельной энергии  $A_W \approx 4 \div 6$  ГПа [6, 7, 9] можно получить значения эффективной скорости струи для пары материалов медь / броневая сталь. Согласно (6) они могут составлять  $W_{eff} \approx 1.4 \div 1.7$  км/с. Близкие значения  $W_{eff}$  следуют из (7), если принять динамическое сопротивление поперечному движению  $R_{t(R)}$  равным статическому пределу текучести броневых сталей  $Y = 0.8 \div 1.4$  ГПа [17]. Более высокое значение  $W_{eff} = 2.4$  км/с следует из (8), если использовать минимальное из известных значение  $C = 0.59$  [16]. Однако все эти скорости недостаточно велики, чтобы объяснить прекращение проникания в испытаниях зарядов на фокусных расстояниях  $F \geq 2CD$  (см. рис. 1).



Рис. 3. Разрез каверны, образованной при проникании кумулятивной струи из порошковой композиции

В случае проникания струи из порошковой композиции при выводе критерия Сендрей необходимо учесть как состояние струи (ее плотность и радиус), так и уплотнение материала струи при проникании. Минимальное значение радиуса каверны для этого случая составляет

$$R_S = r \sqrt{\frac{1 - \phi(1 - \alpha)}{\alpha}}.$$

Эффективная скорость:

$$W_S = \sqrt{\left( \frac{\alpha}{(1 - \alpha)(1 - \phi)} + 1 \right) \frac{2A_W}{\rho_{00}}}.$$

Какой из двух факторов прекращения проникания — величина динамического сопротивления преграды или критерий Сендрей — оказывается доминирующим, определяется прочностными параметрами преграды.

В общем случае

$$\frac{W_{eff}^R}{W_{eff}^S} = \sqrt{\frac{R_t}{A_W} \frac{1 - \alpha}{(1 + \phi)(1 - \phi(1 - \alpha))}}, \quad (9)$$

где  $W_{eff}^R$  — эффективная скорость, обусловленная динамическим сопротивлением,  $W_{eff}^S$  — эффективная скорость, обусловленная критерием Сендрей. Для струи из пластичного металла  $\phi = 0$ .

Из (9) следует, что для пары медь/сталь значение  $W_{eff}^R/W_{eff}^S$  всегда меньше единицы, поскольку  $R_t \leq A_W$  и  $\alpha \approx 0.5$ . То есть для идеально симметричных струй из меди предпочтительной причиной прекращения проникания в стальную преграду является выполнение критерия Сендрей.

Сопоставление двух критериев для проникания порошковых струй является более сложной задачей. Рассматриваемые критерии окончания проникания порошковых струй не носят

«порогового» характера и требуют предельно точного описания параметров проникающей струи и прочностных свойств материала преграды [18–20]. На рис. 3 приведен разрез каверны, сформированной при проникании кумулятивной струи из порошковой композиции. Уширение каверны на замыкающем участке соответствует механизму прекращения проникания по критерию Сендрей. Такая форма замыкающего участка обусловлена тем, что динамическое сопротивление продольному прониканию струи  $R_t$  существенно превышает сопротивление поперечному расширению каверны  $R_{t(R)}$ , поэтому заполнение замыкающего участка каверны отработанным материалом струи приводит преимущественно к его радиальному расширению, а дальнейшее углубление практически отсутствует.

#### КРИТЕРИЙ СЕНДРЕЯ ДЛЯ ФРАГМЕНТИРОВАННОЙ СТРУИ

Два предыдущих фактора прекращения проникания никак не учитывают состояние струи из пластичного металла в момент проникания, которое характеризуется временем разрыва. При достижении времени разрыва кумулятивная струя прекращает удлиняться и распадается на конечное число элементов.

Как следует из результатов экспериментов, появление перетяжек на струе, обусловленных развитием локальных пластических неустойчивостей, отражается на форме каверны в виде образования сужений. Когда струя разрывается на отдельные фрагменты и расстояние между фрагментами увеличивается, размер этих сужений может стать существенным [21]. На рис. 4 приведена форма пробитой каверны в сопоставлении с рентгенограммами струи перед прониканием из работы [4].



Рис. 4. Форма каверны в сопоставлении с формой и положением элементов струи из [4]

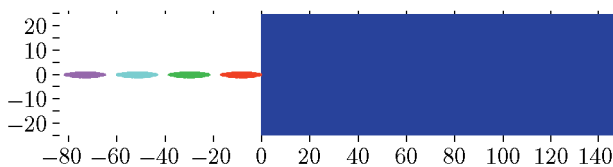


Рис. 5. Постановка расчетной задачи

Отчетливо проявляется зависимость размеров и формы каждого участка каверны от размеров и формы проникающего элемента. Отмечаются локальные сужения между участками, пробитыми соседними фрагментами, а также значительное сужение каверны на заключительном участке. Сравнение с рентгенограммами струи показывает, что ее существенная замыкающая часть в углублении каверны участия не принимает.

На рис. 5 приведена постановка расчетной задачи при моделировании проникания в броневую сталь участка фрагментированной кумулятивной струи, состоящего из четырех эллипсоидов со скоростями 2.0, 2.1, 2.2 и 2.3 км/с. Разница скоростей примерно соответствует типичному значению скорости Хирша (разнице скоростей между соседними элементами) [22]. На рис. 6 приведены расчетные картины течения в разные моменты времени.

Первое сужение каверны образуется меж-

ду участками, пробитыми первым и вторым эллипсоидами. Третий эллипсоид теряет массу и уменьшается в диаметре при прохождении этого сужения, в результате чего пробивает в преграде отверстие меньшего диаметра. Объем этого (третьего) участка каверны становится недостаточным для свободного прохождения четвертого эллипсоида через отработанный материал третьего элемента. В итоге дальнейшего углубления каверны не происходит.

Для учета сужения каверны при проникании в [21] выведена эмпирическая формула для коэффициента пересчета радиуса каверны в зависимости от расстояния между элементами в момент проникания. Для пары материалов медь / броневая сталь было показано, что при наличии зазоров между элементами в 0.4 их длины (и более) диаметр сужения каверны при скоростях менее 3.5 км/с не превышает диаметра проникающих эллипсоидов.

Таким образом, для случая фрагментированной струи граница применимости критерия Сендрейя для пары материалов медь / броневая сталь повышается примерно от 2.4 до 3.5 км/с.

В отличие от струй из пластичных металлов струи из порошковых композиций разрушаются объемно, т. е. представляют поток несвязанных частиц. При проникании таких струй, как видно из рис. 3, образуется кратер без локальных сужений. Состояние струи в этом случае влияет на размеры кратера только через ее текущую плотность.

## СКОРОСТЬ ДРЕЙФА

Известно, что технология изготовления кумулятивных зарядов не позволяет получить идеальную струю, поэтому элементы кумулятивной струи имеют скорость дрейфа в поперечном направлении. Процесс разрыва также сопровождается дополнительным возмущением струи, которое выражается во враще-

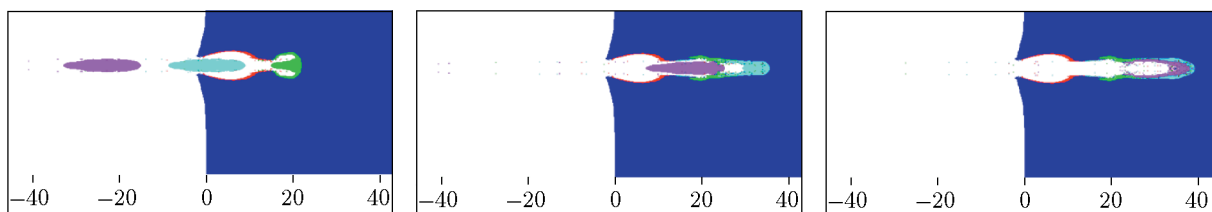


Рис. 6. Расчетные картины течения через 25, 45 и 95 мкс (слева направо)

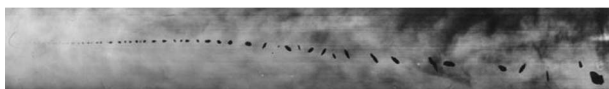


Рис. 7. Синхробаллистический снимок кумулятивной струи, имеющей значительную скорость дрейфа

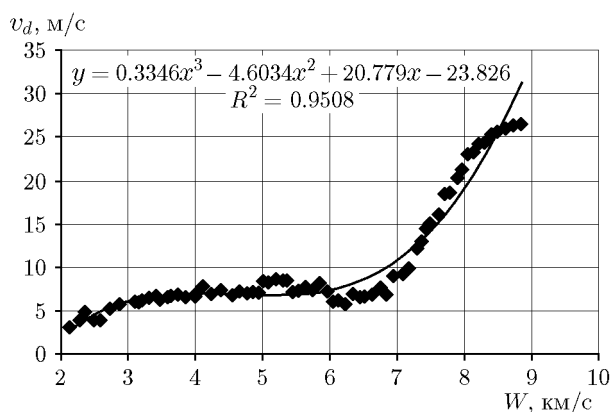


Рис. 8. Скорость дрейфа кумулятивной струи заряда диаметром 150 мм

нии (кувыркании) ее фрагментов. Синхробаллистический снимок кумулятивной струи, имеющей значительную ( $\approx 100$  м/с) скорость дрейфа, для примера приведен на рис. 7.

Таким образом, возникает необходимость учета трехмерных эффектов в инженерной модели. Для учета влияния скорости дрейфа на прекращение проникания используется геометрический подход [23, 24]. Если элемент коснется стенки каверны прежде, чем достигнет дна, то считается, что проникание завершено. Скорость дрейфа может задаваться постоянной вдоль струи или в виде зависимости от осевой скорости  $v_d(W)$  [25, 26]. На рис. 8 приведена зависимость  $v_d(W)$ , полученная для кумулятивного заряда диаметром 150 мм по результатам обработки двух ортогональных синхробалли-

стических снимков струи на двух базах полета [21].

Экспериментальная форма кратера, в боковой стенке которого сформировалось углубление (отмечено стрелкой) в результате столкновения элемента струи со стенкой каверны, приведшего к прекращению проникания, показана на рис. 9.

Для корректного использования скорости дрейфа как одной из причин прекращения проникания, необходимо учитывать факторы, влияющие на итоговый размер кратера: наличие отработавшего материала струи на его стенках и наличие локальных сужений.

### ПОСТРОЕНИЕ РАСЧЕТНЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ ОТ ФОКУСНОГО РАССТОЯНИЯ

Все рассмотренные алгоритмы для определения критических условий прекращения проникания введены в методику АТОС-М [1]. Продемонстрируем их работу на примере модельного заряда диаметром 150 мм с конической кумулятивной облицовкой из меди.

Расчетные фокусные зависимости построены как для идеальной струи (без наличия дрейфа), так и для струи, отклоняющейся от оси выстрела в соответствии с начальной (сообщенной ей при формировании) скоростью дрейфа при следующих условиях:

объем каверны определяется только кинетической энергией струи;

на стенках каверны остается материал отработавшей струи;

при проникании фрагментированной струи формируются локальные сужения.

Для определения диаметра каверны во всех вариантах использовался энергетический подход согласно формуле (6). Варианты расчетов приведены в таблице.

Результаты расчетов относительной пробивной способности  $P/CD$  в сравнении с экспериментальными значениями в широком ин-



Рис. 9. Каверна в стальной преграде с углублением в боковой стенке



Варианты расчетов фокусной зависимости

Вариант расчета	С учетом параметров			
	динамическое сопротивление	скорость дрейфа	материал струи на стенках кратера	сужение
1	+	–	–	–
2	+	–	+	–
3	+	–	+	+
4	+	+	–	–
5	+	+	+	–
6	+	+	+	+

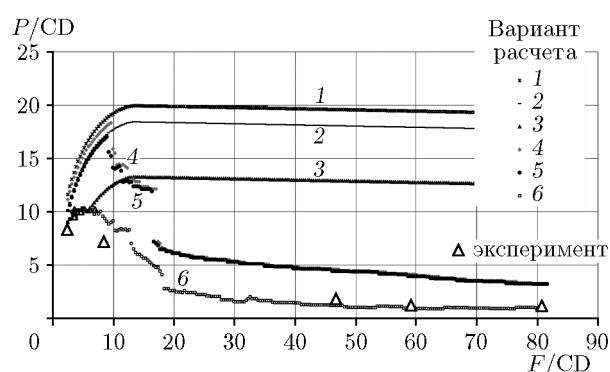


Рис. 10. Сравнение результатов расчета относительной пробивной способности с данными экспериментов

тервале фокусных расстояний приведены на рис. 10. Динамическое сопротивление преграды явилось причиной прекращения проникания только в варианте 1. Учет материала струи на стенках кратера и сужения канала приводит в вариантах 2 и 3 к прекращению проникания по причине недостаточного поперечного размера кратера. В варианте 4 прекращение проникания вызвано наличием скорости дрейфа (элемент струи коснулся стенки кратера). В вариантах 5 и 6 до фокусного расстояния  $2.8CD$  прекращение проникания происходит из-за недостаточного поперечного размера кратера, на больших расстояниях — из-за касания элементом стенки кратера.

Близкое совпадение расчетных значений с экспериментальными данными в рассмотренном интервале фокусных расстояний получено только в варианте 6 при использовании на малых фокусных расстояниях критерия Сендрея

(с учетом сужения каверны и материала струи на ее стенках) и критерия скорости дрейфа (на фокусных расстояниях более  $2.8CD$ ).

## ВЫВОДЫ

Рассмотрен и введен в инженерную модель проникания кумулятивной струи АТОС-М ряд расчетных алгоритмов для определения критических условий окончания проникания и соответствующих им значений эффективной скорости.

Показано, что для струй пластичных металлов (на примере пары материалов медь / броневая сталь) преимущественной причиной, приводящей к прекращению проникания, является наличие поперечной скорости дрейфа. На коротких фокусных расстояниях (менее  $3CD$ ) необходимо учитывать возможность ограничения эффективной скорости по критерию Сендрея для фрагментированной струи.

Установлено, что для струй из порошковых композиций преимущественной причиной прекращения проникания является выполнение критерия Сендрея для сплошной струи (недостаточный объем формируемой каверны). В случае значительного разуплотнения струи необходимо также учитывать возможность влияния динамического сопротивления преграды.

Применение разработанных алгоритмов позволяет проводить достоверные расчеты пробивной способности кумулятивных зарядов, в том числе построение зависимостей величины пробития от фокусного расстояния.

## ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках научной программы Национального центра физики и математики по государственному контракту № Н.4ц.241.4Д.23.1085.

## КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Свирский О. В., Власова М. А., Коротков М. И., Крутяков В. А., Торопова Т. А. Аналитическая модель АТОС-М для расчета

- параметров проникания струй кумулятивных зарядов // Современные методы проектирования и отработки ракетно-артиллерийского вооружения: сб. докл. III Науч. конф. Волжского регион. центра РАН: в 2 т. — Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2004. — Т. 2. — С. 577–582.
2. **Hirsh E.** The natural spread and tumbling of shaped charge jet segments // Propell., Explos., Pyrotech. — 1981. — V. 6, N 4. — P. 104–111. — DOI: 10.1002/prop.19810060406.
  3. **Held M.** Penetration cutoff velocities of shaped charge jets // Propell., Explos., Pyrotech. — 1988. — V. 13, N 4. — P. 111–119. — DOI: 10.1002/prop.19880130405.
  4. **Boeka D., Hancock S., Ouye N.** Cutoff velocity in precision shaped charge jets // Proc. 19th Int. Symp. of Ballistics, Interlaken, Switzerland, 7–11 May, 2001. — V. 3. — P. 1471–1478.
  5. **Федоров С. В.** Проникающее действие удлиненных пористых ударников // IX Харитоновские темат. науч. чтения: тр. междунар. конф. — Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2013. — С. 548–552.
  6. **Физика взрыва:** 2 т. / под ред. Л. П. Орленко. — Изд. 3-е. — М.: Физматлит, 2002. — Т. 2.
  7. **Walters W. P., Zukas J. A.** Fundamentals of Shaped Charges. — New York: Wiley Interscience, 1989.
  8. **Eichelberger R. J.** Experimental test of the theory of penetration by metallic jets // J. Appl. Phys. — 1956. — V. 27, N 1. — P. 63–68. — DOI: 10.1063/1.1722198.
  9. **Hirsch E., Mayseless M., Dolinski M.** Cutoff velocity of shaped charge jets // Proc. of the 27th Int. Symp. of Ballistics, Freiburg, Germany, 2013. — V. 2 — P. 1735–1744.
  10. **Chou P. C., Flis F. G., Walters W. P.** Shaped charge jet penetration models // Proc. of the 11th Int. Symp. on Ballistics, Brussels — Belgium, May 1989.
  11. **Szendrei T.** Link between axial penetration and radial crater expansion in hypervelocity impact // Proc. of the 17th Int. Symp. on Ballistics, Midrand, South Africa, 1998. — V. 3. — P. 25–32.
  12. **Grove B.** Oilwell perforators: Theoretical considerations // Proc. of the 22nd Int. Symp. on Ballistics, Vancouver, BC, Canada, November 14–18, 2005. — P. 585–592.
  13. **Held M., Huang N. S., Jiang D., Chang C. C.** Determination of the crater radius as a function of time of a shaped charge jet that penetrates water // Propell., Explos., Pyrotech. — 1996. — V. 21, N 2. — P. 64–69. — DOI: 10.1002/prop.19960210203.
  14. **Held M., Kozhushko A. A.** Radial crater growing process in different materials with shaped charge jets // Propell., Explos., Pyrotech. — 1999. — V. 24, N 6. — P. 339–342. — DOI: 10.1002/(SICI)1521-4087(199912)24:6<339::AID-PREP339>3.0.CO;2-5.
  15. **Held M.** Verification of the equation for radial crater growth by shaped charge jet penetration // Int. J. Impact Eng. — 1995. — V. 17, N 1-3. — P. 387–398. — DOI: 10.1016/0734-743X(95)99864-N.
  16. **Held M.** Theoretical optimum jet diameter profile for maximum penetration // Proc. of the 17th Int. Symp. on Ballistics, Midrand, South Africa, 1998. — V. 2. — P. 259–265.
  17. **Частные** вопросы конечной баллистики / под ред. В. А. Григоряна. — М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2006.
  18. **Mayseless M.** Penetration of porous shaped-charge jets // Proc. of the 16th Int. Symp. on Ballistics, San-Francisco, USA, 1996. — V. 2. — P. 317–326.
  19. **Hirsch E., Mayseless M.** Penetration of porous jets // Proc. of the 25th Int. Symp. on Ballistics, Beijing, China, 2010. — V. 2. — P. 759–763.
  20. **Власова М. А., Свирский О. В., Васильев М. Л.** Особенности эволюции и проникания кумулятивных струй малогабаритных зарядов с порошковыми облицовками // Современные методы проектирования и отработки ракетно-артиллерийского вооружения: сб. докл. VII Науч. конф. Волжского регион. центра РАН: в 2 т. — Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2012. — Т. 1. — С. 494–504.
  21. **Svirskii O. V., Vlasova M. A., Krutyakov V. A., Nechaev A. I., Toropova T. A.** Penetration of a shaped charge jets at long standoff distances // Proc. 21st Int. Symp. on Ballistics, Adelaide, Australia, 2004. — V. 1. — P. 378–382.
  22. **Hirsch E.** A formula for the shaped charge jet breakup-time // Propell., Explos., Pyrotech. — 1979. — V. 14, N 5. — P. 89–94. — DOI: 10.1002/prop.19790040502.
  23. **Moyses M.** Penetration by shaped charge jets with varying off-axis velocity distributions // Proc. of the 17th Int. Symp. on Ballistics, Midrand, South Africa, 1998. — V. 2. — P. 413–420.
  24. **Heider N.** Theoretical analysis of the penetration performance of experimentally measured shaped charge jets // Propell., Explos., Pyrotech. — 1993. — V. 18, N 5. — P. 288–293. — DOI: 10.1002/prop.19930180510.
  25. **Segletes S. B.** Drift Velocity Computations for Shaped-Charge Jets // Rep. ARBRL-MR-003306. — Ballistic Res. Lab., USA, 1983.
  26. **Xiao Q.-Q., Huang Z.-X., Zu X.-D., Jia X.** Influence of drift velocity and distance between jet particles on the penetration depth of shaped charges // Propell., Explos., Pyrotech. — 2016. — V. 41, N 1. — P. 76–83. — DOI: 10.1002/prop.201500051.

Поступила в редакцию 14.11.2023.  
Принята к публикации 29.11.2023.