

01

Особенности проникания элементов кумулятивной струи в стальную преграду

© В.И. Колпаков,¹ И.Р. Кагарманов,^{1,2} И.А. Семенов²

¹ Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, 105005 Москва, Россия

² Акционерное общество Научно-производственное объединение „Базальт“, 105318 Москва, Россия
e-mail: isk4344@yandex.ru

Поступило в Редакцию 10 апреля 2022 г.

В окончательной редакции 10 апреля 2022 г.

Принято к публикации 19 мая 2022 г.

На основе численного моделирования, проведенного с использованием численных методов механики сплошных сред, исследовано влияние на глубину кратеров, формируемых в стальных преградах различной прочности, геометрических и кинематических параметров удлиненных медных ударников цилиндрической формы, имитирующих элементы кумулятивной струи, в диапазоне от 0.3 до 8 km/s. Для описания поведения материалов ударника и преграды использована модель сжимаемой упругопластической среды с переменным значением предела текучести. Установлено, что классическая гидродинамическая теория проникания кумулятивной струи в преграду не учитывает влияния инерционного движения преграды после срабатывания отдельно взятого элемента (эффект периода последствий). Выделено существование трех режимов ударного взаимодействия — высокоскоростного, когда элементы ведут себя как жидкое тело, срабатываются, но не тормозятся; низкоскоростного, когда элементы ведут себя как твердое тело и тормозятся целиком; и промежуточного, когда элементы тормозятся и одновременно деформируются. Показано, что режим торможения медных элементов при высокоскоростном ударе о стальную броневую преграду реализуется при скоростях, меньших 0.8–1 km/s. Показано, что при взаимодействии с преградой высокоскоростной фрагментированной кумулятивной струи суммарная глубина бронепробития будет больше, чем это предсказывает классическая гидродинамическая теория проникания, причем тем больше, чем выше скорость элементов и больше расстояние между ними с одной стороны и меньше прочность преграды с другой стороны.

Ключевые слова: высокоскоростной удар, удлиненный ударник, элемент кумулятивной струи, стальная преграда, кратер, инерционное движение преграды, численное моделирование.

DOI: 10.21883/JTF.2022.09.52921.92-22

Введение

Кумулятивные струи (КС), образующиеся при срабатывании кумулятивных зарядов (КЗ), в процессе своего эволюционного развития последовательно проходят стадии растяжения и фрагментации. Фрагментация КС происходит на конечное число элементов, которые в дальнейшем не изменяют своей длины. При этом головная высокоскоростная часть, как правило, медной КС взаимодействует с преградой, не теряя своей сплошности, а ее хвостовые участки участвуют в процессе бронепробития в виде эшелона элементов,двигающихся друг за другом [1,2]. Диапазон скоростей элементов фрагментированной части медной КС составляет 1–5 km/s.

При проникании кумулятивной струи в стальную преграду для ее высокоскоростных участков, имеющих скорость $v_S > 4–5$ km/s, влиянием прочности взаимодействующих материалов можно пренебречь [1–4]. В этом случае внедрение КС описывается гидродинамической теорией проникания, в которой материалы струи и преграды считаются идеальными несжимаемыми жидкостями, и в предположении стационарности процесса

используется уравнение Бернулли, которое имеет вид

$$\frac{1}{2} \rho_S (v_S - u)^2 = \frac{1}{2} \rho_B u^2, \quad (1)$$

где ρ_S, ρ_B — плотности струи и преграды; v_S — скорость КС; u — скорость проникания (скорость перемещения точки контакта струи с преградой вдоль оси симметрии КС). При этом предполагается, что для элемента струи, имеющего длину l_S и скорость v_S , процесс проникания (срабатывания) завершается за время

$$t_S = \frac{l_S}{v_S - u}.$$

В этом случае в преграде образуется каверна глубиной

$$L = ut_S = \frac{ul_S}{v_S - u}. \quad (2)$$

Из выражения (1) следует соотношение

$$\frac{u}{v_S - u} = \sqrt{\frac{\rho_S}{\rho_B}},$$

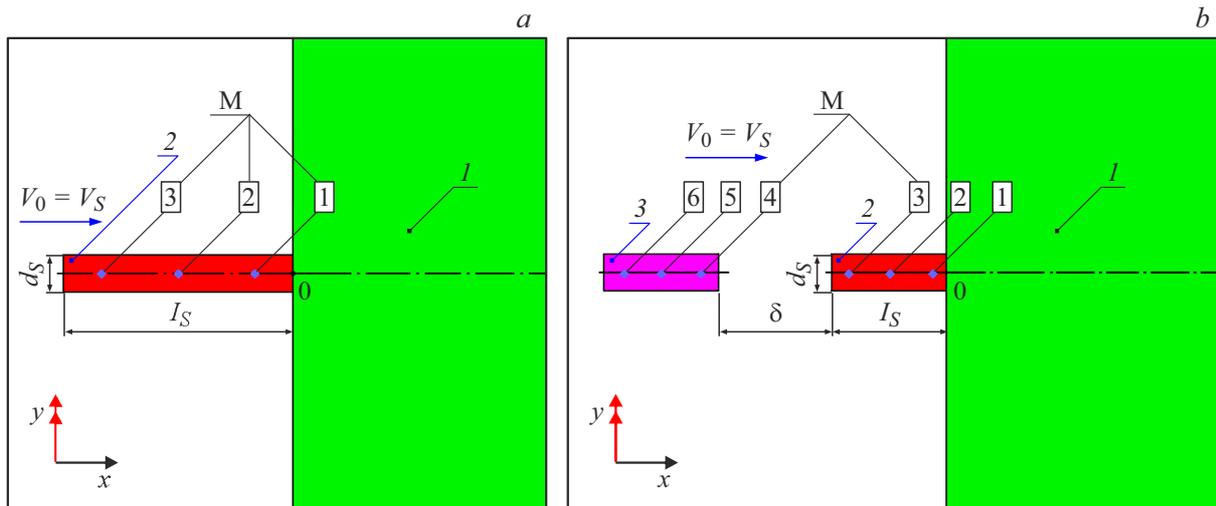


Рис. 1. Расчетные схемы ударного взаимодействия одного (а) и двух ударников (б) с преградой, где 1 — преграда; 2, 3 — ударники; М (№ 1–6) — подвижные реперные точки (маркеры); $v_0 = v_s$ — начальная скорость ударников; d_s, l_s — диаметр и длина ударника; δ — расстояние между ударниками; „О“ — начальная точка схемы ударного взаимодействия.

которое с учетом (2) преобразуется к виду, называемому формулой Лаврентьева

$$L = l_s \sqrt{\frac{\rho_s}{\rho_B}} \tag{3}$$

Формула Лаврентьева хорошо зарекомендовала себя для вычисления глубины проникания КС в различные преграды. Согласно (3), глубина проникания является независимой величиной от скорости струи и прочностных характеристик преграды, поэтому в формуле Лаврентьева на случай пробития преграды отдельными элементами КС (ударниками) заложены следующие противоречия. С одной стороны, кинетическая энергия ударника должна перейти в работу по углублению каверны (преодолению сил сопротивления) и нагрев преграды. Поэтому глубина пробития должна возрастать при увеличении скорости ударника. Известные эмпирические зависимости фиксируют этот факт. Например, в работе [1] для описания кратерной схемы внедрения ударника в стальную преграду предложена зависимость вида

$$L = 5.25(mv^2)^{1/3},$$

где m — масса ударника, [g]; v — скорость, [km/s]; L — глубина пробития, [mm].

С другой стороны, необходимо отметить, что в выражении (2) глубина бронепробития L ограничивается временем срабатывания элемента струи t_s . К этому моменту времени слои преграды, прилегающие к контактной поверхности, разделяющей поверхности ударника и преграды, еще находятся в инерционном движении. Поэтому в период последействия (после момента срабатывания ударника) каверна будет продолжать расширяться и углубляться до полной остановки всех слоев преграды, прилегающих к поверхности контакта. Зависимость (3)

не учитывает этого эффекта. Однако если представить себе КС непрерывным потоком отдельных элементов, то после срабатывания о преграду одного из них сразу же наступает ее взаимодействие с последующим элементом. В этом случае период последействия не реализуется.

1. Формулировка задачи

Оценка влияния эффекта последействия на бронепробиваемость в настоящей работе оценивалась посредством численного моделирования процесса ударного взаимодействия с использованием программного комплекса ANSYS-AUTODYN в двумерной осесимметричной постановке в эйлеровой системе координат. При этом использовались две расчетные схемы, схематично показанные на рис. 1.

В качестве типовых элементов КС использовались медные цилиндры диаметром $d_s = 2$ mm, но разной длины. В первой схеме длина цилиндра составляла $l_s = 12$ mm, а во второй схеме — $l_s = 6$ mm. В качестве уравнений состояния стальной преграды и медных элементов использовалась линейная баротропная зависимость вида

$$p = K \left(\frac{\rho}{\rho_0} - 1 \right),$$

где K — модуль объемного сжатия; ρ_0, ρ — начальное и текущее значения плотности материала. Для стали модуль объемного сжатия принимался равным $K = 159$ GPa, а начальная плотность — $\rho_0 = 7.83$ g/cm³; для меди — $K = 129$ GPa и $\rho_0 = 8.93$ g/cm³.

Для описания напряженно-деформированного состояния материалов элементов КС и преграды использовалась упругопластическая модель Джонсона–Кука с

переменным пределом текучести [5]

$$Y = (A + B\varepsilon_p^n)(1 + C \ln \xi_p)(1 - T_H^m), \quad (4)$$

где Y — динамический предел текучести материала; $T_H = (T - T_0)/(T_m - T_0)$ — гомологическая температура; ε_p — истинная пластическая деформация; ξ_p — скорость деформации; T_m — температура плавления; T_0, T — начальная и текущая температуры; A, B, C, n, m — эмпирические константы.

2. Оценка инерционного движения стальной преграды на бронепробиваемость элементов КС

На рис. 2 представлены результаты численного моделирования процесса ударного взаимодействия цилиндрического элемента длиной 12 mm (рис. 1, а) с преградой в диапазоне скоростей 0.3–8 km/s, иллюстрирующие изменение конечной глубины каверны L_1 с учетом периода последствия в зависимости от начальной скорости ударника v_S . При этом в качестве преграды использовались броневая сталь средней твердости и конструкционная сталь средней твердости 40ХНМА, описываемые моделью пластичности (4) со следующими числовыми значениями эмпирических констант: для броневой стали — $A = 0.86$ GPa, $B = 3.5$ GPa; для конструкционной стали — $A = 0.79$ GPa, $B = 0.51$ GPa. Остальные параметры в выражении (4) для обеих марок сталей принимались одинаковыми и равными $n = 0.26$, $C = 0.014$, $m = 1.03$,

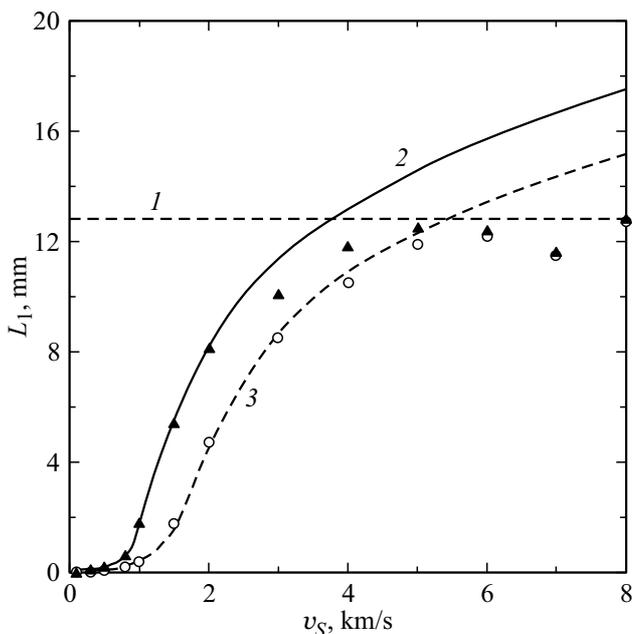


Рис. 2. Зависимости, характеризующие влияние скорости на глубину проникания элемента КС: 1 — $L_B = 12.8$ mm; 2, 3 — L_1 для стали 40ХНМА и броневой стали соответственно; ▲ — L_C для 40ХНМА; ○ — L_C для броневой стали.

$T_m = 1793^\circ\text{K}$. Для медных элементов аналогичные параметры модели Джонсона–Кука принимали следующие числовые значения: $A = 0.09$ GPa, $B = 0.292$ GPa, $n = 0.31$, $C = 0.025$, $m = 1.09$, $T_m = 1356^\circ\text{K}$.

Сплошной линией на рис. 2 выделены данные расчетов для конструкционной стали 40ХНМА, а штриховой линией — для броневой стали средней твердости. Из рисунка видно, что с увеличением скорости элемента глубина каверны растет. Однако при низких начальных скоростях ударника ($v_S < 1$ km/s) процесс проникания практически прекращается, что соответствует экспериментально установленному уровню критической скорости проникания для КС. Кроме того, из анализа рис. 2 следует, что для более мягкой стали 40ХНМА при одной и той же скорости внедрения ударника каверна имеет большую глубину, чем для более твердой броневой стали (сплошная линия идет выше штриховой линии). Этот факт также согласуется с экспериментальными результатами.

Для элемента КС длиной 12 mm глубина бронепробития, вычисленная по формуле (3), составляет $L_B = l_S \sqrt{\rho_S / \rho_B} = 12 \sqrt{8.93 / 7.83} = 12.8$ mm. На рис. 2 она показана горизонтальной штриховой линией. Согласно гидродинамической теории проникания, указанная глубина соответствует моменту полного срабатывания ударника. Кроме того, на указанном рисунке закрашенными треугольниками и прозрачными кружками показаны расчетные значения глубин каверн в преграде, определенные в момент полного срабатывания элементов, движущихся с различной скоростью, без учета инерционного расширения каверны (параметр L_C). При этом треугольники соответствуют конструкционной стали 40ХНМА, а кружки — броневой стали.

Из анализа данных, представленных на рис. 2, следует, что при низких скоростях ударника глубина каверны в момент его полного срабатывания (параметр L_C) практически совпадает с линиями, характеризующими уровень конечной глубины каверны L_1 с учетом периода последствия. Для стали 40ХНМА этот интервал скоростей соответствует значениям $v_S < 2$ km/s; а для броневой стали — $v_S < 4$ km/s. Для более высоких скоростей внедрения ($v_S > 4$ km/s) период последствия играет более существенную роль в процессе бронепробития. При этом для рассмотренных стальных преград расхождение в значениях величин L_C и L_1 увеличивается, а значение параметра L_C выходит на постоянный уровень, приблизительно равный глубине бронепробития, вычисленной по формуле Лаврентьева. Необходимо отметить также, что немонокотность в поведении числовых значений L_C на рис. 2 обуславливается погрешностью в установлении момента полного срабатывания элемента КС при проведении расчетов.

Таким образом, результаты прямого математического моделирования процесса проникания удлиненного элемента КС в стальные преграды подтверждают предположение о том, что формула Лаврентьева справедлива

для высокоскоростных участков КС, если они представляют собой непрерывный поток дискретных элементов. В этом случае после срабатывания о преграду каждого отдельного элемента сразу же наступает взаимодействие с последующим элементом. При этом период последствия не реализуется. В целом же результаты выполненного математического моделирования подтверждают справедливость основных положений гидродинамической теории, описывающей процесс проникания высокоскоростных частей КС ($v_S > 4$ km/s) в преграду.

3. Оценка прочностных эффектов на проникающую способность элементов КС

При небольших скоростях струи ($v_S < 4$ km/s), характерных для ее средних и хвостовых участков, заметную роль начинают играть прочностные эффекты. Кроме того, в этом случае, как уже было отмечено выше, в стальную преграду внедряется не сплошная струя, а эшелон элементов. В первом приближении прочностные свойства материалов преграды и КС можно учесть путем модификации гидродинамической модели проникания. При этом, следуя работе [3], уравнение Бернулли, модифицированное в соответствии с подходом Алексеевского–Тейта, записывается в виде

$$\frac{1}{2}\rho_S(v_S - u)^2 + Y_S = \frac{1}{2}\rho_B u^2 + H_D, \quad (5)$$

где H_D — динамическая твердость материала преграды из броневой стали; Y_S — динамический предел текучести материала струи. Параметр H_D в выражении (5) трактуется как прочностное сопротивление преграды прониканию элементов КС. Следует также отметить, что при внедрении медного элемента КС в преграду из броневой стали выполняется условие $H_D \gg Y_S$.

Уменьшение глубины проникания КС при увеличении прочности преграды определяется отношением динамической твердости преграды к давлению полного торможения кумулятивной струи. Это безразмерное отношение называют числом (критерием) Эйлера:

$$Eu = \frac{2H_D}{\rho_S v_S^2}. \quad (6)$$

Прочностное сопротивление преграды останавливает внедрение элементов КС, когда генерируемое ими давление торможения становится равным динамической твердости преграды, т.е. при $Eu = 1$. Максимальная остаточная скорость КС, когда бронепробитие прекращается, называется критической. Оценка критической скорости проникания можно осуществить по формуле

$$v_{CR} = \sqrt{\frac{2H_D}{\rho_S}}. \quad (7)$$

Для проведения расчетов по формуле (7) необходимо определить значение величины динамической твердости преграды H_D . Согласно формуле Р. Хилла, для стали величина H_D связана с динамическим пределом текучести Y_B зависимостью $H_D = 3Y_B$ [3]. Числовое значение Y_B , в свою очередь, связано со статическим пределом текучести $\sigma_{0.2}$ соотношением [4]

$$Y_B = (1.5 - 2)\sigma_{0.2}.$$

В результате получается оценка

$$H_D = (4.5 - 6)\sigma_{0.2}.$$

Согласно последнему выражению, при $\sigma_{0.2} = 0.86$ GPa [3] оценка величины динамической твердости для броневой стали средней твердости составляет $H_D = 3.9 - 5.2$ GPa, а величина критической скорости для медной КС, вычисленная по формуле (7) при плотности меди $\rho_S = 8.93$ g/cm³, равна $v_{CR} = 0.93 - 1.08$ km/s. Следует отметить, что существующие экспериментальные оценки критической скорости для пробития броневой стали элементами медной КС по разным источникам имеют значительный разброс и изменяются от 1 до 3 km/s.

Опишем характер изменения состояния самих элементов КС при проникании. Для этого будем использовать модификацию числа Эйлера (6):

$$Eu_S = \frac{2Y_S}{\rho_S v_S^2}.$$

Когда инерционные силы элемента КС (ударника) намного превосходят силу его внутреннего сопротивления, т.е. когда выполняется условие

$$\frac{1}{2}\rho_S v_S^2 \gg Y_S \quad \text{или} \quad Eu_S \ll 1 \quad (\text{т.е. } Eu_S \approx 0),$$

материал элемента при соударении ведет себя как жидкое тело. При этом торможение испытывает только передняя часть ударника, контактирующая с преградой. Хвостовая же часть ударника в это же время продолжает движение с текущей скоростью.

При низкоскоростном ударе, т.е. при условии

$$\frac{1}{2}\rho_S v_S^2 \ll Y_S \quad \text{или} \quad Eu_S \gg 1,$$

материал элемента струи ведет себя как твердое тело. В этом случае элемент тормозится целиком, т.е. во время удара скорости во всех его частях одинаковы и постепенно снижаются со временем.

При промежуточных значениях скоростей ударника, определяемых условиями

$$\frac{1}{2}\rho_S v_S^2 \approx Y_S \quad \text{или} \quad Eu_S \approx 1,$$

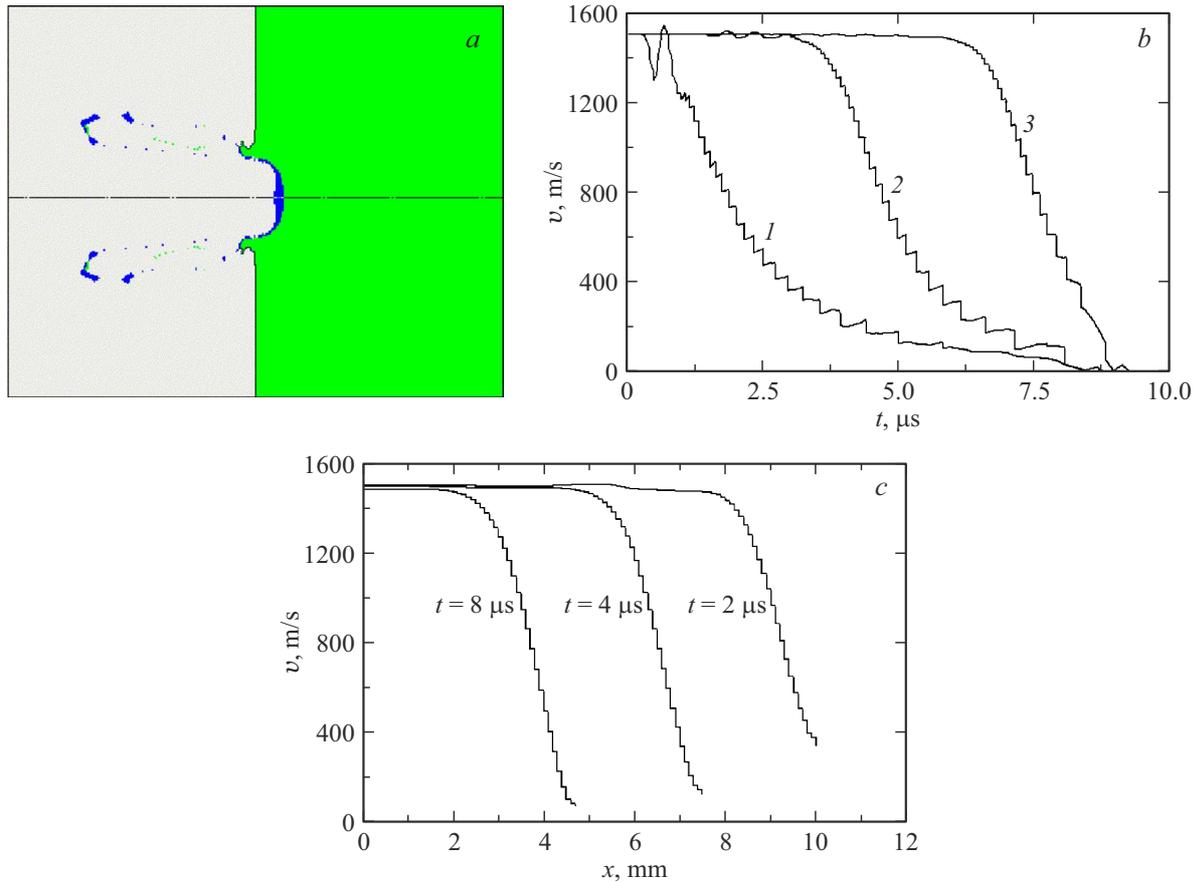


Рис. 3. Внедрение элемента КС в броневую преграду со скоростью $v_0 = 1500 \text{ m/s}$: *a* — конечное положение взаимодействующих между собой материалов ($t = 25 \mu\text{s}$); *b* — зависимости изменения скорости от времени для подвижных маркеров (1–3); *c* — распределения скоростей по длине элемента в различные моменты времени.

находится переходная область, когда элемент КС начинает тормозиться при ударе и одновременно срабатывать или деформироваться. Этой области соответствует условие

$$\frac{1}{2} \rho_s v_s^2 \approx Y_s$$

и характерная скорость внедрения

$$v_{s0} = \sqrt{\frac{2Y_s}{\rho_s}}. \quad (8)$$

Для медного элемента КС, согласно формуле (4), при $\sigma_{0,2} = 0.09 \text{ GPa}$ динамический предел текучести равен $Y_s = (1.5-2)\sigma_{0,2} = 135-180 \text{ MPa}$. При этом характерная скорость равна $v_{s0} = 174-200 \text{ m/s}$. Согласно данным работы [5], динамический предел текучести для меди при проникании КС в стальную преграду составляет около 0.4 GPa , а в работе [6] используется значение 0.2 GPa . В этих случаях числовые значения v_{s0} составляют $212-300 \text{ m/s}$.

Из сопоставления формул (7) и (8) видно, что критическая скорость проникания для медного элемента струи (v_{CR}) много больше его характерной скорости (v_{s0}). Поэтому, согласно выполненным оценкам, элементы струи, обладающие скоростью выше критической и еще

способные к бронепробитию, в процессе срабатывания будут вести себя как жидкие тела, т.е. продолжать двигаться с текущей скоростью.

Оценка степени влияния прочностных эффектов на проникающую способность элементов КС, двигающихся с различной скоростью, также проводилась в двумерной осесимметричной постановке, с помощью программного комплекса ANSYS-AUTODYN. Для этого использовалась расчетная схема, показанная на рис. 1, *a*. При этом, как и при оценке эффекта последействия, в качестве типового элемента использовался медный цилиндр диаметром 2 mm и длиной 12 mm (поз. 2), а в качестве преграды — стальная броневая сталь. Начальная скорость движения элемента (v_0) направлена вдоль его продольной оси симметрии (слева–направо) и изменялась диапазоне от 1.5 до 0.5 km/s . Кроме того, на рисунке показаны подвижные реперные точки (маркеры) и стальная преграда (поз. 1). С помощью подвижных маркеров, установленных вдоль продольной оси элемента на удалении $2, 6$ и 10 mm от его правого торца, осуществлялась фиксация изменения скорости различных частей элемента КС в процессе его взаимодействия с преградой.

Ниже на рис. 3–5 представлены результаты численного моделирования процесса ударного взаимодействия.

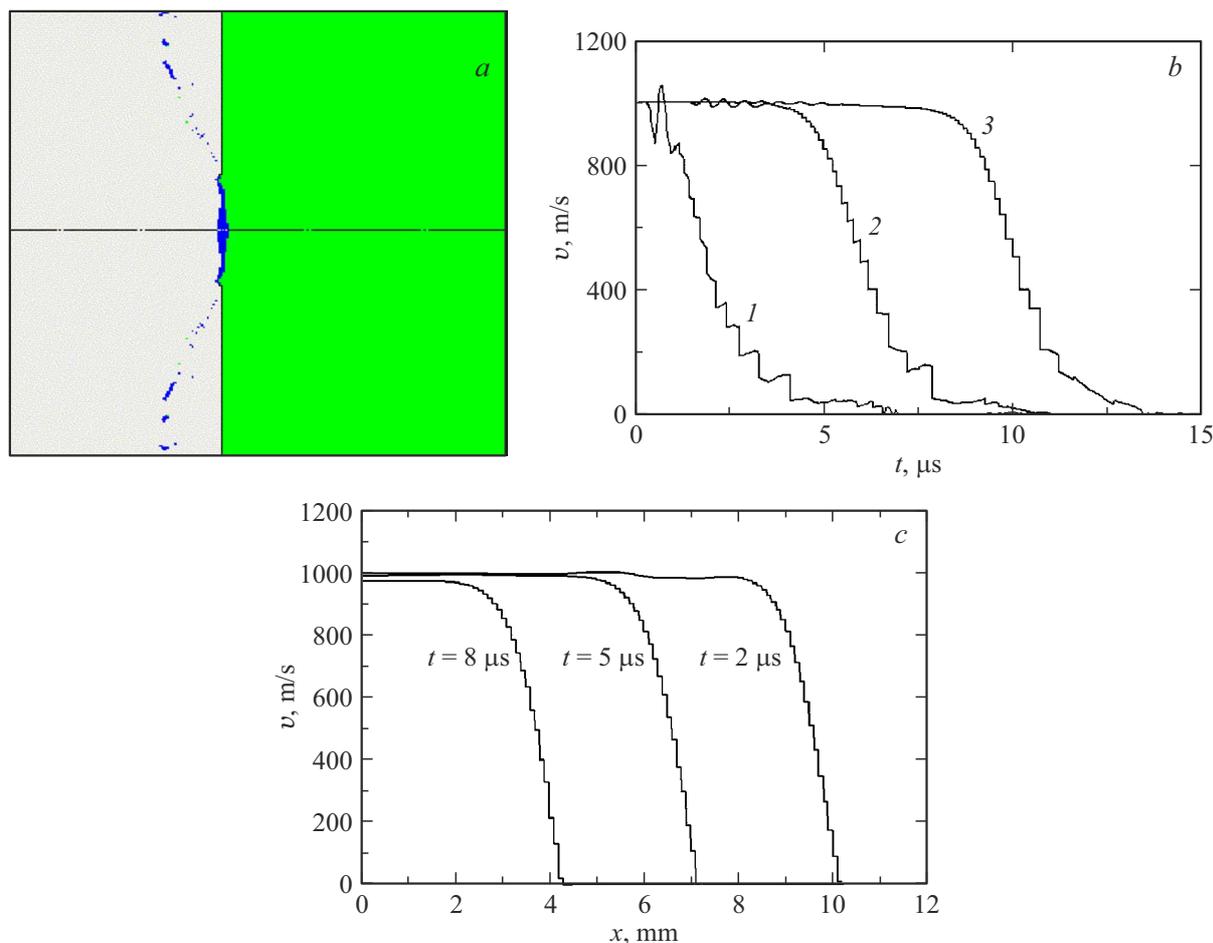


Рис. 4. Внедрение элемента КС в броневую преграду со скоростью $v_0 = 1000$ м/с: *a* — конечное положение взаимодействующих между собой материалов ($t = 25 \mu\text{s}$); *b* — зависимости изменения скорости от времени для подвижных маркеров (1–3); *c* — распределение скоростей по длине элемента в различные моменты времени.

Следует отметить, что скорость звука в меди составляет $c_0 = 3.94$ км/с. Поэтому для описываемого диапазона начальных скоростей внедрения ($v_0 \leq 1.5$ км/с) движение элемента КС имеет дозвуковой характер, и при ударе по материалу ударника (элемента КС) от переднего торца к заднему начинает распространяться звуковая волна сжатия, которая и передает ему информацию об ударе через промежуток времени $\Delta t = l/c_0 \approx 3 \mu\text{s}$.

Рис. 3 иллюстрирует процесс внедрения элемента КС в преграду с начальной скоростью $v_0 = 1.5$ км/с. При этом на рис. 3, *a* показано конечное состояние элемента и преграды, а на рис. 3, *b* представлены временные зависимости изменения скорости в реперных точках элемента. На рис. 3, *c* для различных моментов времени показаны распределения скоростей по длине еще не сработавшей части элемента КС (x), которая отсчитывается от его заднего торца. При этом длина самого элемента со временем постоянно уменьшается.

Из рис. 3, *a* видно, что в преграде образовалась каверна, а элемент КС полностью сработался и растекся по ее стенкам. Анализ графических зависимостей,

представленных на рис. 3, *b, c*, показывает, что тыльные участки элемента КС при его внедрении в препятствие практически не тормозятся, а в головной части элемента, расположенной в непосредственной близости от контактной поверхности с преградой, присутствует переходный участок, ширина которого составляет около 2.5–3 мм. Вдоль этого участка скорость ударника резко снижается, а его материал испытывает интенсивные пластические деформации. В это же время материал тыльной области находится в упругом состоянии.

На рис. 4 представлены результаты расчетов ударного взаимодействия с начальной скоростью $v_0 = 1.0$ км/с, иллюстрирующие, что в данном случае каверна в преграде практически отсутствует (рис. 4, *a*). Следовательно, начальная скорость внедрения элемента КС в преграду в этом случае близка к числовым значениям критической скорости бронепробития. При этом тыльные участки элемента при внедрении в препятствие тормозятся незначительно (рис. 4, *b, c*).

На рис. 5 представлены результаты расчетов процесса внедрения элемента КС в преграду с начальной скоро-

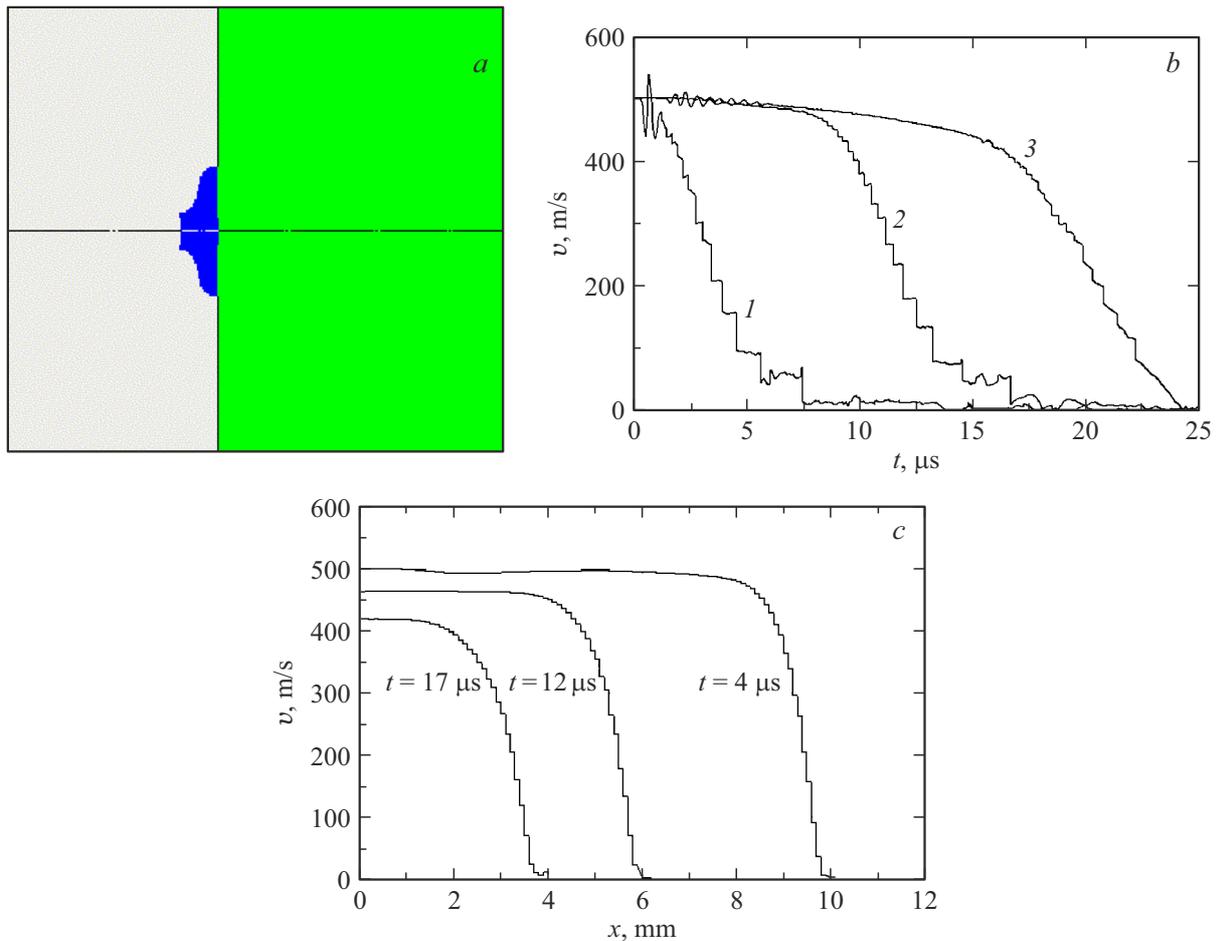


Рис. 5. Внедрение элемента КС в броневую преграду со скоростью $v_0 = 500 \text{ m/s}$: *a* — конечное положение взаимодействующих между собой материалов ($t = 25 \mu\text{s}$); *b* — зависимости изменения скорости от времени для подвижных маркеров (1–3); *c* — распределение скоростей по длине элемента в различные моменты времени.

стью $v_0 = 0.5 \text{ km/s}$. Из рис. 5, *a* видно, что в этом случае пробития преграды не происходит, а ударник после остановки принимает вид „лепешки“. Кроме того, анализ данных, показанных на рис. 5, *b, c*, свидетельствует о том, что при данной скорости соударения тыльные участки элемента КС в процессе удара тормозятся существенно.

Необходимо отметить, что результаты выполненных расчетов находятся в соответствии с ранее представленной теоретической оценкой числового значения критической скорости ($v_{CR} = 0.93\text{--}1.08 \text{ km/s}$). Действительно, как видно из рис. 3 при начальной скорости ударника $v_0 = 1.5 \text{ km/s}$ каверна в преграде еще образуется, а при $v_0 = 1.0 \text{ km/s}$ — практически отсутствует (рис. 4).

Таким образом, по результатам выполненных расчетов можно сделать вывод, что при высокоскоростном режиме внедрения, когда инерционные силы элемента кумулятивной струи (ударника) намного превосходят силы его внутреннего сопротивления, материал элемента ведет себя как жидкое тело. При этом торможение испытывает только передняя часть ударника, контактирующая с преградой. Хвостовая же часть ударника в это

же время продолжает движение с начальной скоростью, т. е. материал ударника срабатывает, а не тормозится.

4. Результаты расчетов взаимодействия с преградой фрагментированной КС

Как отмечалось выше, при взаимодействии с преградой фрагментированной КС, представляющей собой эшелонированный поток элементов, разделенных друг от друга воздушным промежутком, период последствия начинает играть более существенную роль в процессе бронепробития, чем при внедрении ее отдельных элементов. Поэтому в этом случае можно ожидать, что суммарная глубина бронепробития будет больше, чем при расчете по формуле Лаврентьева.

Для подтверждения такого суждения было выполнено компьютерное моделирование процесса внедрения в различные стальные преграды двух одинаковых цилиндрических элементов диаметром $d_S = 2 \text{ mm}$ и длиной $l_S = 6 \text{ mm}$, расположенных соосно друг за другом на

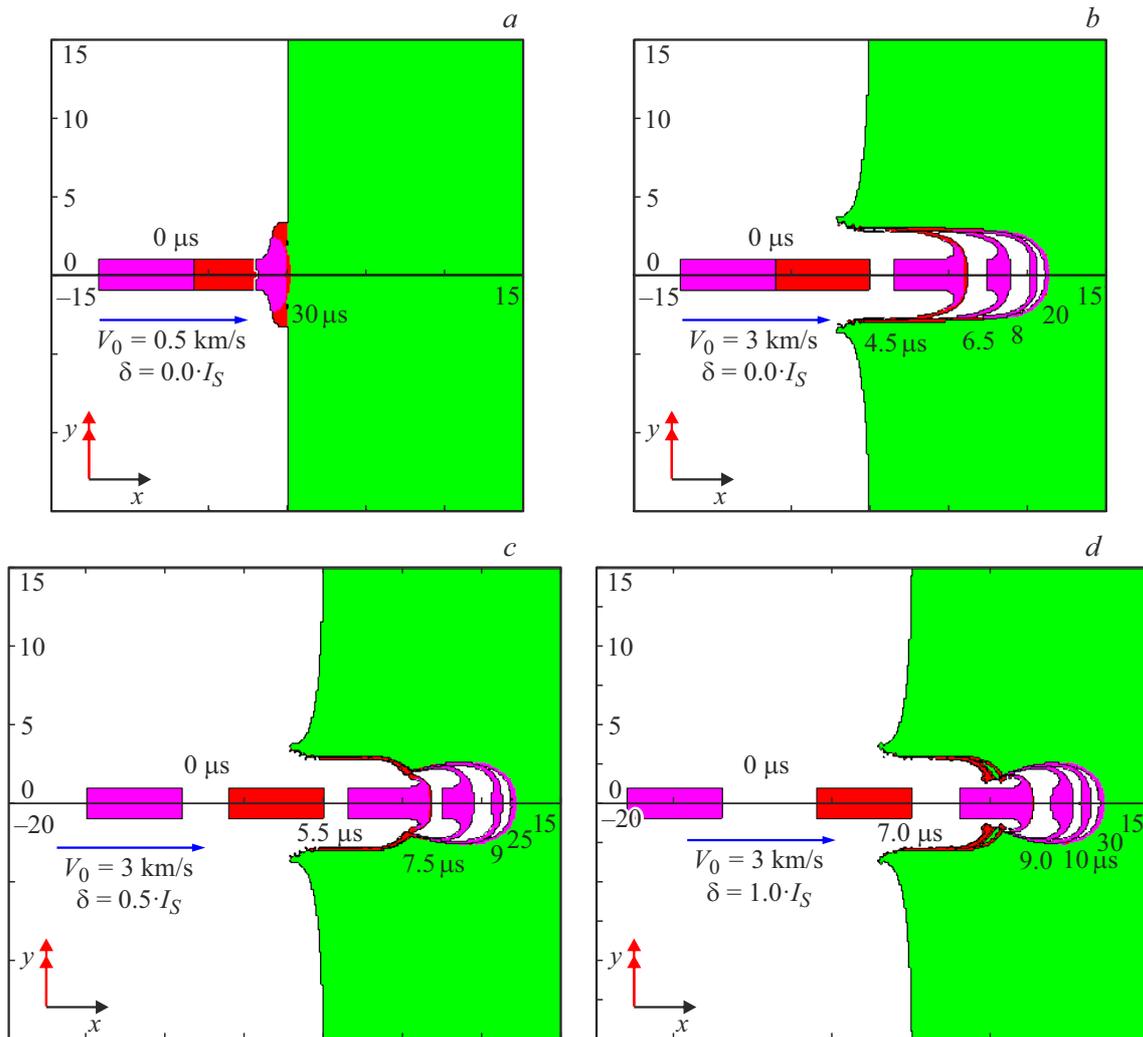


Рис. 6. Ударное взаимодействие двух медных элементов с преградой из конструкционной стали 40ХНМА: *a* — $v_0 = v_s = 0.5 \text{ km/s}$, $\delta/l_s = 0$; *b* — $v_0 = 3.0 \text{ km/s}$, $\delta/l_s = 0$; *c* — $v_0 = 3.0 \text{ km/s}$, $\delta/l_s = 0.5$; *d* — $v_0 = 3.0 \text{ km/s}$, $\delta/l_s = 1.0$.

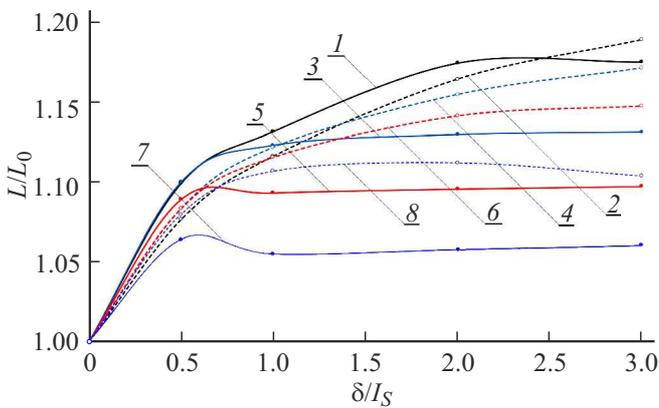


Рис. 7. Сравнение относительной глубины пробития различных стальных преград L/L_0 медными элементами КС от относительного расстояния δ/l_s между ними: 1, 3, 5, 7 — броневая сталь; 2, 4, 6, 8 — сталь 40ХНМА; v_s , km/s: 1, 2 — 8; 3, 4 — 6; 5, 6 — 5; 7, 8 — 4.

различных расстояниях и движущиеся с одинаковой скоростью (рис. 1, *b*). В расчетах варьировались скорость и расстояние между элементами (δ) в диапазоне от 0 до 18 mm ($0 \leq \delta/l_s \leq 3$). При этом определялась суммарная глубина внедрения элементов L . Результаты расчетов в виде иллюстраций представлены на рис. 6, *a* в виде графиков $L/L_0 = f(\delta/l_s)$ на рис. 7, 8 и $L/L_0 = f(v_s)$ на рис. 9, где L_0 — глубина пробития элементов при $\delta = 0$.

Как видно из рис. 7, при проникании в различные стальные преграды двух следующих друг за другом элементов наблюдается эффект суперпозиции от их совместного действия. При этом увеличение глубины проникания по сравнению с действием сплошной струи ($\delta = 0$) тем больше, чем выше скорость элементов и больше расстояние между ними с одной стороны и меньше прочность преграды, с другой стороны. Сплошными линиями на этом рисунке показаны расчетные графические зависимости ударного взаимодействия эле-

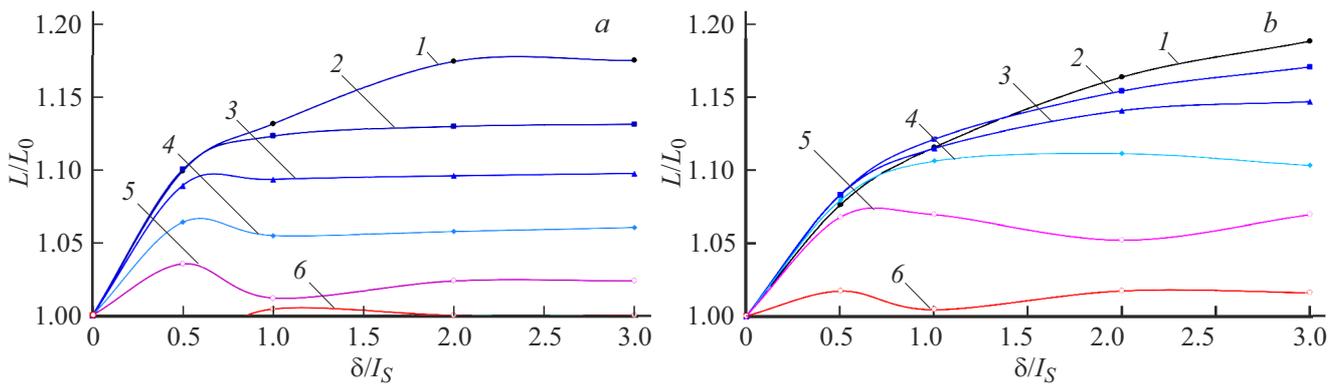


Рис. 8. зависимости относительной глубины пробития броневой преграды (а) и преграды из конструкционной стали 40ХНМА (b) L/L_0 медными элементами КС от относительного расстояния δ/l_s между ними: v_s , km/s: 1 — 8, 2 — 6, 3 — 5, 4 — 4, 5 — 3, 6 — 2.

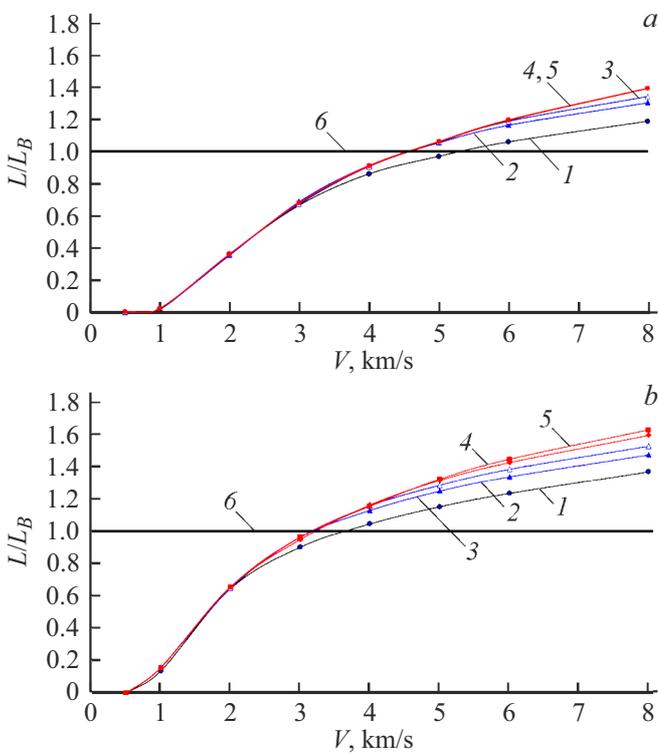


Рис. 9. зависимости относительной глубины пробития броневой преграды (а) и преграды из конструкционной стали 40ХНМА (b) L/L_B медными элементами КС от скорости, δ/l_s : 1 — 0, 2 — 0.5, 3 — 1, 4 — 2, 5 — 3, 6 — теоретическое значение ($L_B = 12.8$ mm).

ментов со скоростями 8, 6, 5 и 4 km/s по броневой преграде, а штриховыми линиями — по преграде из конструкционной стали 40ХНМА. Эффект суперпозиции наблюдается до скоростей $v_s \approx 2$ km/s (рис. 8). Однако его влияние на суммарную глубину бронепробития постепенно падает от 17–19% при скорости 8 km/s до 1–2% при скорости 2 km/s. Более того, как видно из рис. 9, суммарный эффект от совместного действия

медных элементов КС по преграде из броневой стали со скоростью меньшей, чем 4.6–5.2 km/s, становится меньшим, чем это предсказывает гидродинамическая теория проникания (рис. 9, а). При действии же по преграде из конструкционной стали 40ХНМА указанный диапазон скоростей составляет 3.2–3.8 km/s (рис. 9, b).

Полученные результаты моделирования показывают также, что при скоростях взаимодействия ниже критических бронепробитие не происходит, а при скоростях выше критических несработавшая часть первого элемента в процессе пробития не испытывает торможения. Подобный эффект распространяется на все фрагментированные элементы КС, способные вносить вклад в бронепробитие. Вследствие этого при одинаковой скорости элементов второй элемент не догоняет первый и начинает свое внедрение через некоторый промежуток времени после полного срабатывания первого элемента.

Необходимо отметить также, что в отличие от представленных результатов в ранее выполненных работах [2,7,8] выдвинуто прямо противоположное суждение о механизме внедрения фрагментированной части КС, еще способной к бронепробитию. При этом утверждалось, чтодвигающиеся в виде эшелона элементы КС „затормаживаются“ в процессе своего срабатывания на преграде за счет того, что каждый последующий элемент как бы „натывается“ на предшествующий ему „заторможенный“ элемент и начинает срабатывать не на преграде, а на предшествующем элементе. В итоге именно эффект „взаимного влияния“ приводит к уменьшению суммарной глубины бронепробития хвостовой части КС. В отличие от этого данные, представленные в настоящей работе, показывают, что уменьшение глубины внедрения хвостовой части КС обусловлено не эффектом взаимного влияния ее элементов друг на друга при проникании, а связано с прочностными характеристиками конкретной преграды.

Заключение

1. Представлены результаты математического моделирования процесса проникания удлиненных элементов КС в стальные преграды из броневой стали средней твердости и конструкционной стали средней твердости 40ХНМА в широком диапазоне начальных скоростей 0.3–8.0 km/s. При этом показано, что классическая гидродинамическая теория проникания кумулятивной струи в преграду (формула Лаврентьева) не учитывает влияния инерционного движения преграды после срабатывания отдельно взятого элемента кумулятивной струи (эффект периода последействия).

2. Доказана справедливость гидродинамической теории проникания только для высокоскоростных участков КС, представляющей собой непрерывный поток элементов, следующих в непосредственной близости друг за другом. В этом случае после срабатывания на преграде каждого отдельно взятого элемента сразу же наступает внедрение последующего элемента, и эффект инерционного движения преграды в период последействия отсутствует.

3. Показано существование трех режимов ударного взаимодействия элементов медной КС со стальной преградой, а именно высокоскоростного режима, когда элементы ведут себя как жидкое тело (материал ударника срабатывается, но не тормозится); низкоскоростного режима, когда элементы ведут себя как твердое тело и тормозятся целиком; и промежуточного режима, находящегося между первым и вторым. В последнем случае элементы струи тормозятся и одновременно деформируются при ударе. Показано, что режим торможения медных элементов КС при высокоскоростном ударе о стальную броневую преграду реализуется при скоростях, меньших 0.8–1 km/s.

4. Показано, что „эффективные“ элементы КС, имеющие скорость выше критической (0.8–1 km/s) и способные вносить вклад в бронепробитие, в процессе удара не тормозятся. Поэтому эффект „эшелонированного“ торможения элементов КС, свойственный ее низкоскоростной части, при котором каждый последующий элемент как бы „натывается“ на предшествующий ему „заторможенный“ о преграду элемент, не оказывает влияния на глубину бронепробития кумулятивного заряда по преградам средней и высокой твердости.

5. Показано, что при взаимодействии с преградой высокоскоростной фрагментированной КС, представляющей собой эшелонированный поток отдельных элементов, разделенных друг от друга воздушным промежутком, инерционное движение преграды в период последействия играет более существенную роль в процессе бронепробития. В этом случае можно ожидать, что суммарная глубина бронепробития будет больше, чем это предсказывает классическая гидродинамическая теория проникания, причем тем больше, чем выше скорость элементов и больше расстояние между ними с

одной стороны и меньше прочность преграды, с другой стороны.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] *Физика взрыва*, под ред. Л.П. Орленко (Физматлит, М., 2004), изд. 3-е, испр. в 2 т., т. 2, 656 с.
- [2] С.А. Кинеловский, Ю.А. Тришин. *ФГВ*, **16** (5), 26–40 (1980).
- [3] *Частные вопросы конечной баллистики*, В.А. Григорян, А.Н. Белобородько, Н.С. Дорохов [и др.]; под ред. В.А. Григоряна (Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, М., 2006), 592 с.
- [4] Г.И. Каннель, С.В. Разоренов, А.В. Уткин, В.Е. Фортгов. *Ударно-волновые явления в конденсированных средах* (Янус–К, М., 1996), 408 с.
- [5] *Методы исследования свойств материалов при интенсивных динамических нагрузках: Монография*, под общ. ред. М.В. Жерноклетова (РФЯЦ-ВНИИЭФ, Саров, 2005), 2-е изд., доп. и испр., 428 с.
- [6] Л.П. Орленко, А.В. Бабкин, В.И. Колпаков. *Задачи прикладной газодинамики: Результаты численного решения* (МВТУ им. Н.Э. Баумана, М., 1988), 104 с.
- [7] И.И. Томашевич. *ФГВ*, **23** (2), 97–101 (1987).
- [8] W.P. Walters, W.J. Flis, P.C. Chou. *Int. J. Impact Engineer.*, **7** (3), 307–325 (1988).