

УДК 53.043

ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ СКОРОСТИ КОМПАКТНЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ УДАРНИКОВ ПРИ НЕИЗМЕННОЙ КИНЕТИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ НА РАЗМЕРЫ ФОРМИРУЕМОГО В СТАЛЬНОЙ ПРЕГРАДЕ КРАТЕРА

С. В. Фёдоров, В. И. Колпаков, С. В. Ладов

Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, 105005 Москва
sergfed-64@mail.ru

На основе численного моделирования, проведенного с использованием двух различных вычислительных комплексов, исследовано влияние на размеры кратеров, формируемых в стальных преградах различной прочности, скорости компактных металлических ударников сферической и цилиндрической форм в диапазоне $2 \div 10$ км/с. Для описания поведения материалов ударника и преграды использована модель сжимаемой упругопластической среды с постоянным пределом текучести. В качестве материала ударников рассмотрены медь, титан и тантал. При задании массы и скорости ударников обеспечивалась неизменность их кинетической энергии. Установлено, что зависимости глубины кратера от скорости ударников с постоянной кинетической энергией имеют точку максимума, а объем кратеров с увеличением скорости монотонно снижается.

Ключевые слова: высокоскоростной удар, компактный ударник, стальная преграда, кратер, кинетическая энергия, пластическая диссипация, ударно-волновая диссипация, численное моделирование.

DOI 10.15372/FGV20210413

ВВЕДЕНИЕ

Исследования высокоскоростного взаимодействия ударников с различными преградами представляют интерес как с фундаментальной [1–4], так и с прикладной точки зрения [5–7], давая информацию о поведении материалов в экстремальных условиях сверхвысоких давлений и скоростей деформирования, необходимую, например, при разработке противометеоритной (от воздействия высокоскоростных частиц естественного и искусственного происхождения) защиты космических аппаратов [8–11]. Целенаправленные и последовательные исследования высокоскоростного соударения твердых тел начались в нашей стране во второй половине 50-х годов прошлого века в Институте гидродинамики СО АН СССР по инициативе и под руководством академика М. А. Лаврентьева. Сотрудниками этой организации были получены обширные и важные результаты как в области выявления закономерностей ударного взаимодействия материалов [12–15], так и в области разработки методов ускорения тел до высоких скоростей для проведения лабораторных экспериментов [16].

В отношении высокоскоростного метания тел наибольшие успехи были достигнуты в разработке взрывных методов [17, 18], которые в силу простоты и низкой стоимости реализации в сравнении с другими методами в настоящее время в разных вариациях широко применяются многими группами исследователей [19–22].

В работах [23–25] был проанализирован набор параметров, оказывающих влияние на высокоскоростное соударение и размеры ударных кратеров. С учетом этих данных и приведенных в [12, 26] обычно считают, что кратеры в полубесконечных преградах из изотропных пластичных материалов, образующиеся при воздействии компактных ударников со скоростями свыше 2 км/с, имеют форму, близкую к полусферической. При этом объем кратера V_c принимается в первом приближении пропорциональным начальной кинетической энергии ударника $W_{i,0}$ [1, 3, 12, 26]. В этом случае зависимость глубины кратера h_c от скорости ударника v определяется соотношением $h_c \sim v^{2/3}$. По данным [12, 26] конечная глубина кратера действительно удовлетворяет степенной зависимости вида $h_c \sim v^\alpha$, однако показатель степени α в ней варьируется в довольно

широком диапазоне ($0.3 \leq \alpha \leq 0.85$).

Отклонения α от $2/3$ связаны как с отличием формы реальных кратеров от полусферической, так и с нарушениями в выполнении исходного положения о пропорциональности объема кратера кинетической энергии ударника. Положение о том, что $V_c \sim W_{i,0}$, базируется на модели формирования полусферического ударного кратера в идеально пластичном материале, в которой используется предположение о переходе всей кинетической энергии ударника в энергию пластического деформирования преграды, которая, в свою очередь, рассчитывается в предположении постоянства предела текучести $\sigma_{Y,t}$ материала преграды. Обоснование данной модели приведено в [3, 12, 27].

В [12] для объяснения отклонений α от $2/3$ предложено учитывать возрастание предела текучести $\sigma_{Y,t}$ с увеличением скорости деформирования материала преграды $\dot{\epsilon}$, оцениваемой отношением скорости ударника v к его диаметру (ударник предполагался сферическим). При этом использовалась степенная зависимость $\sigma_{Y,t} \sim \dot{\epsilon}^\beta$ (по данным [12] показатель степени β для преград из различных металлов варьируется примерно в диапазоне $0.1 \div 0.4$). В результате влияние скорости ударника на объем формируемого в металлической преграде кратера и его глубину (в предположении полусферической формы кратера) реализуется в форме соотношений $V_c \sim v^{2-\beta}$ и $h_c \sim v^{(2-\beta)/3}$, т. е. значение $\alpha = (2 - \beta)/3$ оказывается в этом случае несколько ниже $2/3$. В [12] высказано также предположение, что при высоких скоростях соударения (на уровне 10 км/с и выше) определяющая роль во влиянии на размеры ударного кратера переходит от кинетической энергии к импульсу ударника, предопределяющему пропорциональность объема ударного кратера скорости соударения, $V_c \sim v$.

Таким образом, экспериментальные данные [1, 28] и данные численного моделирования, проанализированные в [1, 12, 27], свидетельствуют об отклонениях в выполнении соотношения пропорциональности между объемом ударных кратеров и кинетической энергией ударника, на что также указано в одной из последних публикаций по рассматриваемому вопросу [29]. Выяснение физических причин, по которым базовая для соотношения $V_c \sim W_{i,0}$ модель формирования ударного кратера в идеально пластичном материале «срабатывает» неточно, а также того, действительно ли

единственной причиной этого является неучет в модели зависимости прочностных свойств материала преграды от скорости его деформирования [12, 27], представляет интерес как в фундаментальном, так и в прикладном отношении. Отсутствие четкого понимания в этом вопросе приводит к тому, что расчетное прогнозирование результатов высокоскоростного взаимодействия ударников с металлическими преградами часто по-прежнему базируется на соотношении $V_c \sim W_{i,0}$. В качестве примера можно привести определение диаметра канала, пробиваемого кумулятивной струей в преграде, в методиках расчета пробивного действия кумулятивных зарядов. В подавляющем большинстве случаев оно основывается на предположении пропорциональности объема участка пробоины, формируемого элементом кумулятивной струи, кинетической энергии этого элемента [3, 30–32]. В методиках, учитывающих влияние на пробитие кумулятивного заряда бокового дрейфа участков кумулятивной струи, возникающих вследствие технологических неточностей изготовления заряда [31, 32], некорректность определения диаметра пробиваемого струей канала при необоснованном использовании «энергетического» подхода может существенно исказить результирующую глубину пробития преграды.

Целью настоящей работы являлось получение дополнительной информации о зависимости размеров (объема и глубины) ударного кратера в металлической преграде от скорости компактного ударника с выяснением физических причин возможных отклонений от результатов, предсказываемых базовой моделью формирования ударного кратера в идеально пластичном материале [12, 27]. Исследования проводились на основании численного моделирования в рамках двумерной осесимметричной задачи механики сплошных сред в предположении, что взаимодействие ударника с преградой происходит по нормали к ее поверхности. Использовались два вычислительных комплекса — программный комплекс ANSYS/AUTODYN [33] в варианте реализации эйлерово-лагранжева метода с выделением контактных разрывов и программа моделирования взрывных и ударных процессов ЭРУДИТ [34–37], разработанная в МГТУ им. Н. Э. Баумана и реализующая вычислительный алгоритм свободных лагранжевых точек, сходный по основной идее с алгоритмом [38].

ФОРМУЛИРОВКА ЗАДАЧИ

Для описания поведения материалов ударника и преграды использовалась модель сжимаемой упругопластической среды с условием пластичности Мизеса [3] при постоянном значении пределов текучести $\sigma_{Y,i}$, $\sigma_{Y,t}$ соответственно для материалов ударника и преграды. В расчетах были рассмотрены стальные преграды малой, средней и высокой твердости, характеризующиеся пределами текучести 0.5, 1.0 и 1.5 ГПа соответственно. Уравнения состояния материалов ударника и преграды брали в форме Ми — Грюнайзена с упругой составляющей давления p в форме Тэта [3]

$$p = A[(\rho/\rho_0)^n - 1] + \gamma\rho e_t, \quad (1)$$

где ρ , ρ_0 — плотность материала и ее значение в нормальных условиях, γ — коэффициент Грюнайзена, e_t — тепловая составляющая удельной внутренней энергии, A , n — эмпирические параметры. Коэффициент Грюнайзена γ принимался постоянным.

Для стальной преграды использовались значение модуля сдвига $G = 70$ ГПа и следующие значения параметров в уравнении состояния (1): $\rho_0 = 7850$ кг/м³, $A = 21.5$ ГПа, $n = 5.5$, $\gamma = 1.8$ [3].

Компактные ударники имели либо сферическую форму, либо форму цилиндра высотой, равной диаметру (рис. 1,а). В качестве материала ударников были рассмотрены металлы с существенно различающимися плотностями: медь Cu, титан Ti (плотность примерно вдвое ниже, чем у меди) и тантал Ta (плотность примерно вдвое выше, чем у меди). Используемые для материалов ударников значения параметров в уравнении состояния (1), а также модуля сдвига G и предела текучести $\sigma_{Y,i}$ приведены в таблице [3].

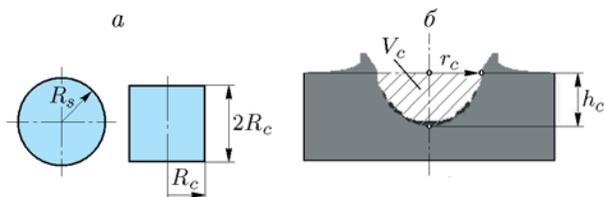


Рис. 1. Форма рассматриваемых компактных ударников (а) и определяемые в расчетах параметры ударных кратеров в стальной преграде (б)

Характеристики материалов ударников

| Материал | ρ_0 , кг/м ³ | A , ГПа | n | γ | G , ГПа | $\sigma_{Y,i}$, МПа |
|----------|---------------------------------|--------------|-----|----------|--------------|-------------------------|
| Ti | 4510 | 26.0 | 3.8 | 1.3 | 40 | 300 |
| Cu | 8900 | 30.2 | 4.8 | 1.8 | 50 | 300 |
| Ta | 16460 | 45.8 | 4.0 | 1.6 | 70 | 500 |

Скорость взаимодействия ударников с преградой варьировалась в диапазоне $2 \div 10$ км/с. При таких скоростях соударения согласно данным [12] еще не должны проявляться эффекты, связанные с испарением материалов рассматриваемых взаимодействующих пар в волне разрежения (не учитываемые в расчетной модели), и определяющее влияние на форму и размеры ударных кратеров оказывает соотношение плотностей и прочностных свойств материалов ударника и преграды.

Для того чтобы четко установить, насколько справедливо часто принимаемое в исследованиях положение об определяющем влиянии кинетической энергии ударника на размеры кратера при различных скоростях соударения, расчеты проводились при неизменном значении кинетической энергии. Соответственно, с увеличением скорости ударников их массу задавали снижающейся обратно пропорционально квадрату скорости.

При сравнительном анализе размеров кратеров, формировавшихся в стальных преградах при различных скоростях ударников, в качестве масштабирующих параметров использовались диаметр d_0 и объем $V_0 = \pi d_0^3/6$ медного сферического ударника с минимальным из рассматривавшихся значением скорости $v_0 = 2$ км/с. Через массу этого ударника m_0 определяли массы m ударников с более высокими скоростями v : $m = m_0 v_0^2/v^2$. При одной и той же скорости сферических и цилиндрических ударников из одного материала их радиусы R_s и R_c (см. рис. 1,а) в соответствии с условием постоянства объема удовлетворяли соотношению $R_s/R_c = \sqrt[3]{3/2} \approx 1.145$. В расчетах определяли глубину h_c сформировавшихся ударных кратеров (на оси симметрии от уровня невозмущенной лицевой поверхности преграды), их объем V_c , ограничиваемый сверху плоскостью невозмущенной лицевой поверхности, и входной радиус r_c в той же плоскости (рис. 1,б).

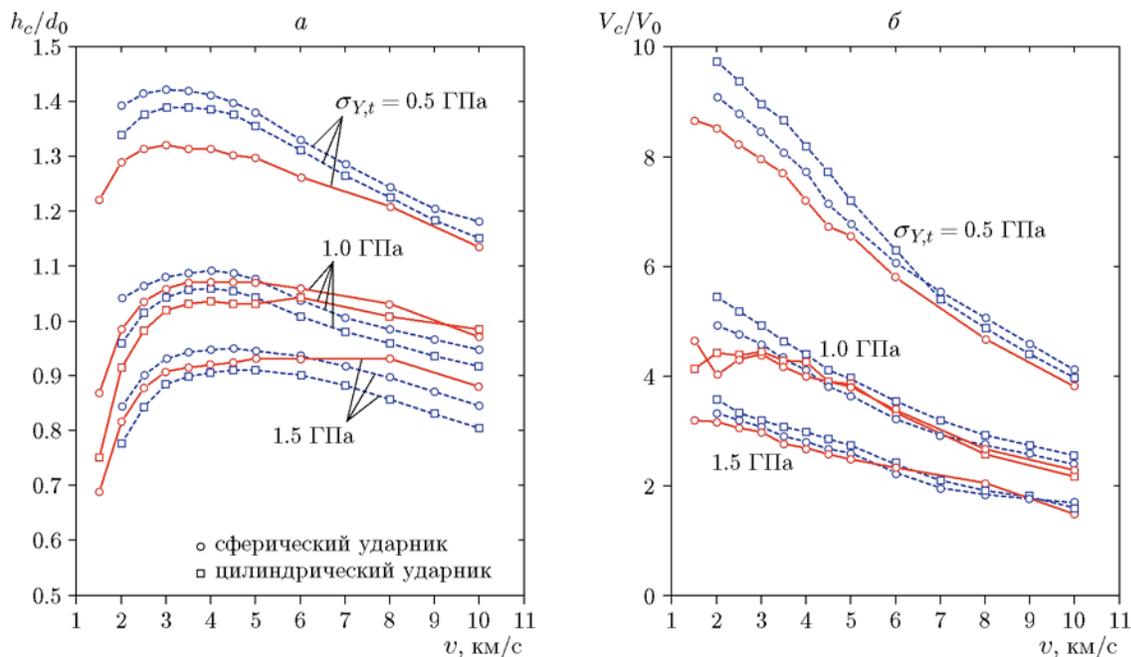


Рис. 2. Влияние скорости медных ударников с постоянной кинетической энергией на глубину (а) и объем (б) кратеров в стальных преградах различной прочности по результатам численного моделирования с использованием программных комплексов ANSYS/AUTODYN (сплошные линии) и ЭРУДИТ (штриховые линии)

ОБЪЕМ И ГЛУБИНА КРАТЕРОВ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ МЕДНЫХ УДАРНИКОВ

На рис. 2 приведены зависимости относительных глубины h_c/d_0 и объема V_c/V_0 кратеров от скорости соударения медных сферических и цилиндрических ударников со стальными преградами с различными прочностными свойствами, полученные по результатам численного моделирования с использованием программных комплексов ANSYS/AUTODYN и ЭРУДИТ. Как видно, обе вычислительные методики, существенно различающиеся используемыми алгоритмами, дали хорошо согласующиеся между собой результаты (максимальное расхождение по глубине кратеров не превышает 8 %, а по объему — 20 % при одинаковых по обеим методикам характерах изменения глубины и объема с увеличением скорости). Максимум расхождений приходится на область скоростей взаимодействия, примыкающую к нижней границе рассмотренного скоростного диапазона, что связано, очевидно, с более существенным проявлением при низких скоростях влияния прочностных свойств материалов ударника и преграды. В области скоростей взаимодействия выше 5 км/с максимальное различие в прогнозе обоих программных

комплексов по глубине кратеров лежит в пределах 6 %.

Зависимости глубины кратера от скорости ударников с постоянной кинетической энергией в рассмотренном диапазоне скоростей (2 ÷ 10 км/с) имеют экстремальную точку максимума глубины, положение которой зависит от прочностных свойств преграды (рис. 2, а). С их повышением глубина кратера уменьшается, а скорость, соответствующая максимуму глубины, увеличивается примерно от 3 км/с при пределе текучести материала преграды 0.5 ГПа до 6 ÷ 7 км/с при пределе текучести 1.5 ГПа. Одновременно с повышением прочностных свойств преграды максимум глубины образующегося кратера становится менее выраженным, распространяясь на некоторый диапазон скоростей. Ударники сферической формы при прочих равных условиях давали кратер глубиной, несколько превышающей глубину кратеров от ударников цилиндрической формы (на 5 ÷ 10 %), что, очевидно, связано с большим продольным размером (размером в направлении проникания) сферических ударников по сравнению с цилиндрическими при одинаковом их объеме.

Что касается результатов численного мо-

делирования объема кратеров, то анализ полученных зависимостей объема от скорости медного ударника не выявил существования экстремума (рис. 2, б). С увеличением скорости ударника объем кратера монотонно уменьшался. Повышение предела текучести стальной преграды привело примерно к обратно пропорциональному снижению объема. Какого-либо определенного влияния формы ударника на объем кратера не выявлено. Для ударников сферической и цилиндрической форм объема формируемых ими кратеров были примерно одинаковыми с небольшим отклонением в ту или другую сторону.

Для установления физических причин, объясняющих выявленный характер изменения размеров ударных кратеров в зависимости от скорости соударения, по результатам численного моделирования проводился контроль энергопреобразования в процессе высокоскоростного взаимодействия ударника и преграды [39]. Уравнение энергетического баланса для этого процесса записывается в виде

$$W_{i,0} = W_i + W_t + U_i + U_t, \quad (2)$$

где $W_{i,0}$, W_i — соответственно начальная и текущая кинетическая энергия ударника, W_t — кинетическая энергия преграды, U_i , U_t — внутренняя энергия соответственно ударника и преграды. Изменение внутренней энергии материалов ударника и преграды происходит вследствие изменения объема и формы их индивидуальных частиц. С учетом этого для стальной преграды внутренняя энергия представлялась в виде суммы составляющих $U_t = U_{t,s} + U_{t,p}$, обусловленных сжатием $U_{t,s}$ и формоизменением $U_{t,p}$ индивидуальных частиц. В процессе формирования кратера первая из них включает в себя диссипацию энергии на фронте ударной волны в преграде, а вторая в связи с тем, что упругие деформации пренебрежимо малы по сравнению с пластическими, «ответственна» за диссипацию энергии на пластических деформациях материала преграды. По завершении взаимодействия (прекращение движения материалов ударника и преграды) с приобретением кратером окончательной формы и размеров составляющая $U_{t,s}$ представляет собой полную выделившуюся в ней теплоту за счет ударно-волновой диссипации энергии, а составляющая $U_{t,p}$ — полную теплоту в преграде, обусловленную ее пластическим деформированием с формоизменением индивидуаль-

ных частиц. Для ударника разделение внутренней энергии на две указанные выше составляющие не проводилось в связи с ее незначительностью по сравнению с внутренней энергией преграды.

Изменение с течением времени t удельной внутренней энергии e сжимаемой упруго-пластической среды в рассматриваемом двумерном осесимметричном случае описывается дифференциальным уравнением [3]

$$\frac{de}{dt} = \frac{p}{\rho^2} \frac{d\rho}{dt} + \frac{s_r \dot{\epsilon}_r + s_z \dot{\epsilon}_z + s_\theta \dot{\epsilon}_\theta + s_{rz} \dot{\epsilon}_{rz}}{\rho},$$

в котором $\dot{\epsilon}_r$, $\dot{\epsilon}_z$, $\dot{\epsilon}_\theta$, $\dot{\epsilon}_{rz}$ — компоненты тензора скоростей деформаций; s_r , s_z , s_θ , s_{rz} — компоненты девиатора напряжений (индексы r , z , θ соответствуют радиальному, осевому и окружному направлениям цилиндрической системы координат). Численное интегрирование этого уравнения выполнялось с разделением его правой части на два слагаемых:

$$\frac{du_s}{dt} = \frac{p}{\rho^2} \frac{d\rho}{dt},$$

$$\frac{du_p}{dt} = \frac{s_r \dot{\epsilon}_r + s_z \dot{\epsilon}_z + s_\theta \dot{\epsilon}_\theta + s_{rz} \dot{\epsilon}_{rz}}{\rho},$$

где u_s , u_p — составляющие удельной внутренней энергии среды, обусловленные соответственно сжатием и формоизменением ее индивидуальных частиц. С использованием u_s , u_p составляющие полной внутренней энергии преграды $U_{t,s}$, $U_{t,p}$ можно рассчитать по формулам

$$U_{t,s} = \int_{V_t} \rho u_s dV, \quad U_{t,p} = \int_{V_t} \rho u_p dV,$$

в которых интегрирование проводится по объему материала преграды V_t . Полная внутренняя энергия ударника определялась по уравнению

$$U_i = \int_{V_i} \rho e dV$$

с проведением интегрирования по объему V_i , занимаемому материалом ударника.

Изменение в процессе высокоскоростного взаимодействия ударника и преграды слагаемых в правой части уравнения энергетического баланса (2) (с разделением U_t на $U_{t,s}$ и

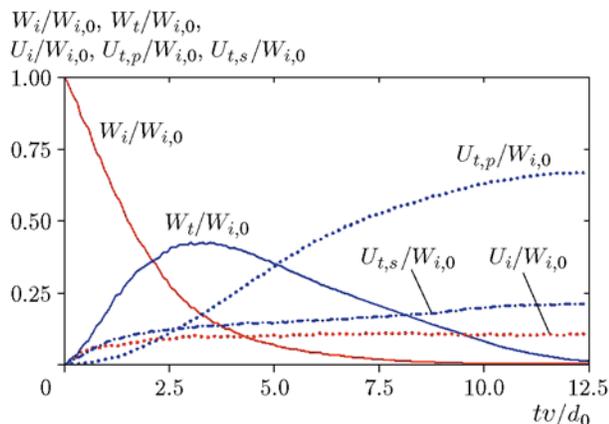


Рис. 3. Преобразование кинетической энергии медного сферического ударника при взаимодействии со стальной преградой с пределом текучести 1.0 ГПа при скорости 3 км/с

$U_{t,p}$) иллюстрирует рис. 3 на примере сферического медного ударника со скоростью $v = 3$ км/с при пределе текучести стальной преграды $\sigma_{Y,t} = 1.0$ ГПа. Видно, что по мере монотонного снижения кинетической энергии материала ударника его внутренняя энергия и внутренняя энергия материала преграды монотонно увеличиваются от нулевого значения. При этом кинетическая энергия материала преграды проходит через точку максимума со значением около 40 % $W_{i,0}$ и затем снова стремится к нулю. По обнулению кинетической энергии материалов ударника и преграды формирование ударного кратера завершается и устанавливаются конечные значения внутренней энергии материалов. При этом внутренняя энергия материала ударника составляет около 10 % от его начальной кинетической энергии, а остальные 90 % $W_{i,0}$ приходятся на внутреннюю энергию преграды. Основной вклад во внутреннюю энергию материала преграды при рассматриваемых условиях соударения вносит пластическая диссипация. Ее вклад примерно втрое превышает вклад от ударно-волновой диссипации.

ВЛИЯНИЕ ПЛОТНОСТИ МАТЕРИАЛА УДАРНИКОВ

Результаты численного моделирования с использованием компьютерной программы ЭРУДИТ формирования кратеров в стальных преградах с различными прочностными свойствами при воздействии сферических ударников из титана, меди и тантала представлены на

рис. 4. Расчеты проведены при неизменной кинетической энергии ударников. Видно, что для ударников с меньшей (титан) и большей (тантал) плотностью, чем у меди, характер изменения глубины и объема ударного кратера в зависимости от скорости соударения сохраняется таким же, как и в случае медного ударника (см. рис. 2). С увеличением скорости до определенного значения глубина кратера возрастает, а затем, пройдя через точку слабо выраженного максимума, монотонно снижается (рис. 4, а). Объем кратера монотонно снижается с увеличением скорости ударников из всех рассмотренных материалов (рис. 4, б).

Если с увеличением прочности стальной преграды уменьшение глубины кратера одновременно сопровождается, как отмечалось выше, смещением точки ее максимума в сторону более высоких скоростей взаимодействия, то повышение плотности ударника, приводя к увеличению глубины кратера, одновременно смещает точку ее максимума в сторону меньших скоростей соударения. Например, для преграды средней прочности ($\sigma_{Y,t} = 1.0$ ГПа) глубина кратера максимальна при скорости 3 км/с в случае танталового ударника, 4 км/с в случае медного и 6 км/с в случае титанового (см. рис. 4, а). При этом для данного значения $\sigma_{Y,t}$ максимум глубины кратера, сформированного ударником из меди, примерно на 26 % меньше сформированного ударником из тантала и примерно на 18 % больше, чем в случае ударника из титана.

Влияние плотности материала ударника на объем кратера проявляется в существенно меньшей степени, чем на глубину кратера (см. рис. 4, б). Заметное различие в объеме кратеров, формируемых ударниками из различных материалов, в пользу ударников большей плотности наблюдается только при скоростях ниже 4 ÷ 5 км/с. В интервале более высоких скоростей ударники из всех трех рассмотренных материалов формировали в стальной преграде с одним и тем же пределом текучести кратеры близкого объема. Темп снижения объема кратеров при увеличении скорости ударников с неизменной кинетической энергией в количественном отношении может быть охарактеризован следующими данными: при двукратном увеличении скорости соударения от 5 до 10 км/с объем кратера в преградах различной прочности уменьшался примерно в 1.6 ÷ 1.8 раза.

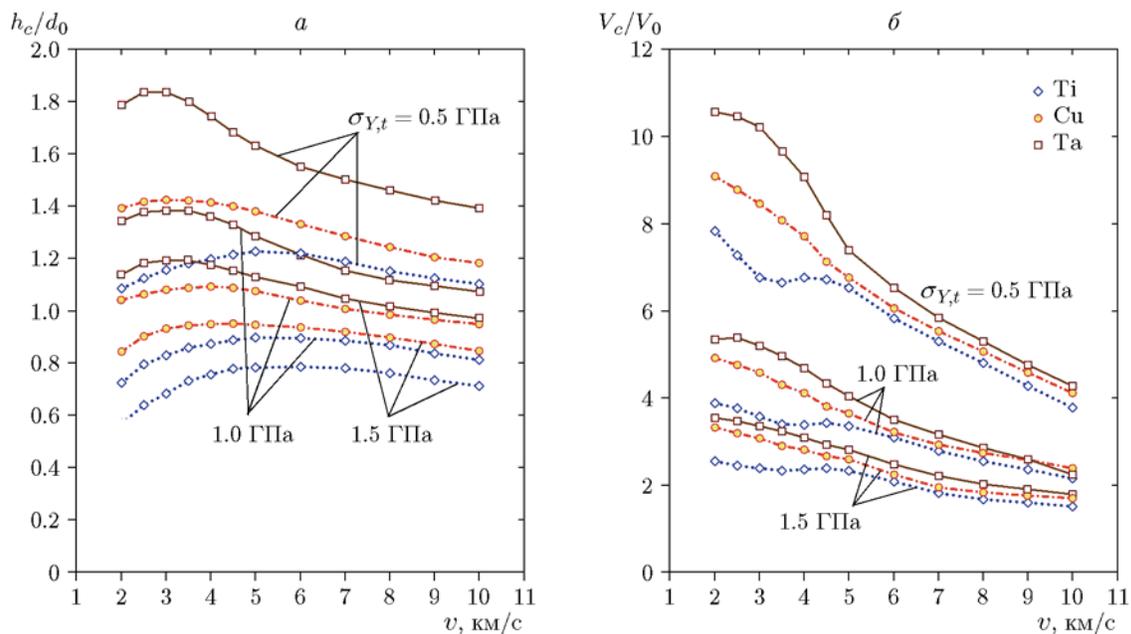


Рис. 4. Изменение глубины (а) и объема (б) ударных кратеров в стальных преградах с варьируемым пределом текучести в зависимости от скорости сферических ударников из различных материалов при их постоянной кинетической энергии

АНАЛИЗ ФОРМЫ КРАТЕРОВ

По результатам расчетов дополнительно анализировались форма ударных кратеров и степень ее отклонения от полусферической. В качестве характеристики формы использовалось отношение глубины кратера к его радиусу во входном сечении h_c/r_c (см. рис. 1, б). Изменение этого параметра в зависимости от скорости сферических ударников из различных материалов с постоянной кинетической энергией при различных прочностных свойствах стальной преграды иллюстрирует рис. 5. Видно, что с увеличением плотности материала ударника кратер становится более вытянутым в осевом направлении, т. е. значение h_c/r_c возрастает (рис. 6). Степень вытянутости кратера возрастает также с повышением скорости соударения. При этом с возрастанием плотности материала влияние скорости ударника на значение h_c/r_c для кратера ослабевает.

Увеличение прочности стальной преграды при прочих равных условиях приводит к некоторому уплощению кратеров со снижением значения h_c/r_c для них (рис. 5, рис. 7). Влияние данного фактора проявляется более отчетливо при снижении плотности материала ударников и их скорости. Для танталовых ударников пре-

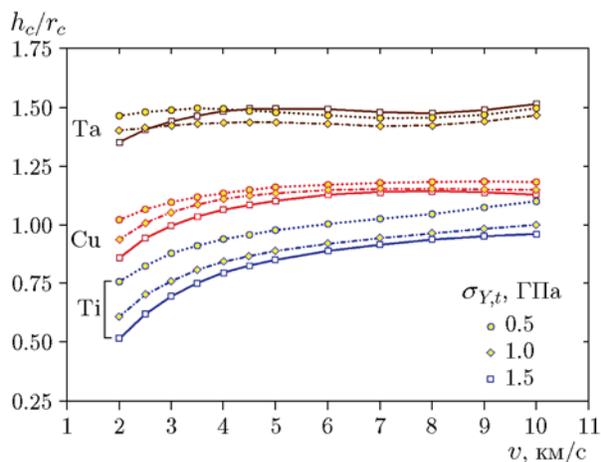


Рис. 5. Влияние скорости сферических ударников из различных материалов с постоянной кинетической энергией на соотношение глубины и радиуса во входном сечении кратеров в стальных преградах с различными прочностными свойствами

дел текучести материала преграды практически не отражается на значениях h_c/r_c для кратеров во всем рассмотренном диапазоне скоростей взаимодействия. То же самое относится и к медным ударникам при скоростях взаимодей-

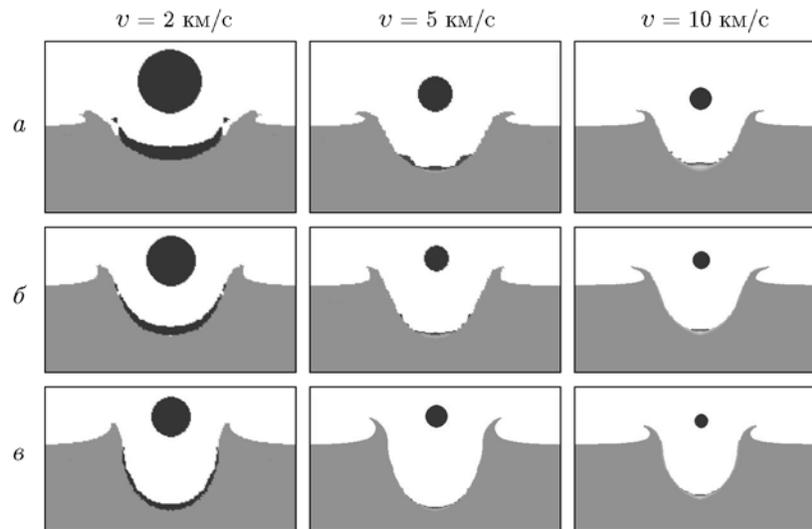


Рис. 6. Результирующая форма кратеров в стальной преграде с пределом текучести $\sigma_{Y,t} = 1.0$ ГПа при воздействии сферическими ударниками из различных материалов (*a* — титан, *б* — медь, *в* — тантал) с различными скоростями при постоянной кинетической энергии

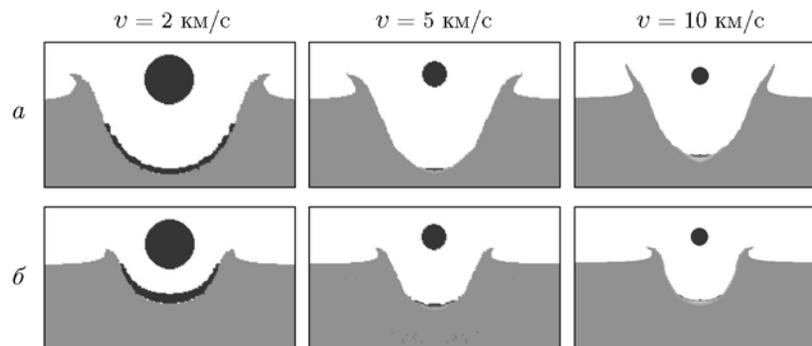


Рис. 7. Результирующая форма кратеров в стальных преградах с пределами текучести $\sigma_{Y,t} = 0.5$ ГПа (*a*) и 1.5 ГПа (*б*) при воздействии медными сферическими ударниками с различными скоростями при постоянной кинетической энергии

ствия выше 5 км/с. В то же время для ударников из титана при увеличении предела текучести стальной преграды $\sigma_{Y,t}$ от 0.5 до 1.5 ГПа отношение h_c/r_c для кратеров снижается от 0.75 до 0.5 при $v = 2$ км/с и от 1.1 до 0.95 при $v = 10$ км/с.

Наиболее близки к полусферическим кратеры, формируемые медными ударниками. Для них при всех рассмотренных скоростях взаимодействия и пределах текучести преграды отношение h_c/r_c находится в диапазоне 0.85 ÷ 1.2 (рис. 5). Данное обстоятельство объясняется, по-видимому, тем, что плотность меди близка к плотности стальной преграды. Для ударников

из титана плотностью, почти вдвое меньшей плотности стали, кратер принимает близкую к полусферической форму ($h_c/r_c \approx 1.0$) лишь при скоростях выше 6 ÷ 7 км/с. В диапазоне скоростей ниже указанного порога титановые ударники формируют уплощенные кратеры. Что касается танталовых ударников плотностью, примерно вдвое большей плотности стали, то формируемые ими кратеры имеют вытянутую вдоль оси форму с приблизительно постоянным значением параметра $h_c/r_c \approx 1.45$ вне зависимости от скорости соударения и прочности стальной преграды.

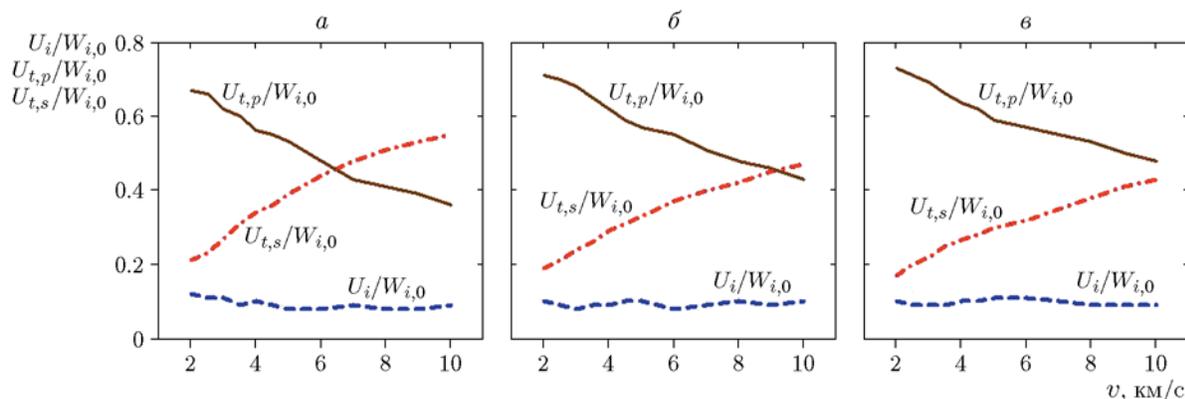


Рис. 8. Изменение результирующих внутренних энергий материалов ударника и преграды в момент полного формирования ударного кратера в зависимости от скорости медных сферических ударников с постоянной кинетической энергией при их взаимодействии со стальными преградами различной прочности:

a — $\sigma_{Y,t} = 0.5$ ГПа, *б* — $\sigma_{Y,t} = 1.0$ ГПа, *в* — $\sigma_{Y,t} = 1.5$ ГПа

ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИЧИНЫ УМЕНЬШЕНИЯ ОБЪЕМА КРАТЕРОВ

Объяснение зафиксированному эффекту уменьшения объема кратеров с увеличением скорости ударников при сохранении неизменной их кинетической энергии может быть дано с привлечением результатов проводившегося анализа энергопреобразования в процессе формирования кратера. На рис. 8 приведены результирующие значения внутренней энергии материалов ударника и преграды по окончании формирования ударных кратеров в стальных преградах с различными прочностными свойствами в зависимости от скорости медного сферического ударника. Видно, что независимо от скорости соударения и прочности преграды во внутреннюю энергию материала ударника переходит около 10 % его начальной кинетической энергии. Остальные 90 % $W_{i,0}$ составляет внутренняя энергия материала преграды, которая по-разному распределяется между ее составляющими $U_{t,s}$ и $U_{t,p}$, связанными с механизмами ударно-волновой и пластической диссипации, при различных скоростях соударения. Увеличение скорости ударника приводит к повышению параметров на фронте ударной волны, распространяющейся в преграде, и, соответственно, к увеличению составляющей ее внутренней энергии $U_{t,s}$, обусловленной ударно-волновой диссипацией (см. рис. 8). При этом снижается доля внутренней энергии преграды $U_{t,p}$, выделившейся в ней вследствие ее пластического деформирования и напрямую

связанной с размерами формируемого кратера.

Таким образом, уменьшение объема кратеров с увеличением скорости ударника при его неизменной кинетической энергии может быть объяснено тем, что повышение скорости соударения влечет за собой рост «непродуктивного» расходования кинетической энергии ударника при генерировании в преграде ударной волны. Конечно, материал преграды за фронтом ударной волны вовлекается в движение, приобретая кинетическую энергию, идущую в дальнейшем на формирование ударного кратера. Однако этот «ударно-волновой разгон» материала преграды сопровождается необратимыми диссипативными потерями энергии на фронте волны (ведущими только к нагреву материала), доля которых возрастает с увеличением интенсивности волны и, соответственно, скорости соударения. Если для стальной преграды с пределом текучести $\sigma_{Y,t} = 1.0$ ГПа при скорости медного сферического ударника $v = 2$ км/с значение $U_{t,p}$ в 3.7 раза превышает значение $U_{t,s}$, то при скорости ударника $v = 10$ км/с и той же его кинетической энергии становится большей примерно на 10 % уже составляющая внутренней энергии преграды $U_{t,s}$ (см. рис. 8, б). На рис. 8 обращает на себя внимание также тот факт, что с повышением прочностных свойств преграды при неизменной скорости ударника баланс составляющих внутренней энергии преграды, обусловленных механизмами ударно-волновой и пластической диссипации, смещается в сторону увеличения доли $U_{t,p}$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное численное моделирование подтверждает наличие отклонений от положения о пропорциональности объема кратера в полубесконечной преграде кинетической энергии компактного ударника: $V_c \sim mv^2$. Как показали расчеты, при постоянной кинетической энергии ударников объем формируемого ими кратера уменьшается с увеличением скорости соударения. Для диапазона скоростей взаимодействия $5 \div 10$ км/с, в котором для ударников из существенно различающихся по плотности материалов (титан, медь, тантал) получены примерно одинаковые результаты по объему кратеров, зависимость объема от скорости может быть приближенно описана соотношением вида $V_c \sim mv^{1.3}$. Показатель степени в этом соотношении ближе к единице, чем к двум, что согласуется с предположением [12] об определяющем влиянии на размеры кратера не кинетической энергии, а импульса ударника. Однако в отличие от [12, 27], где для объяснения степенной зависимости объема кратера от скорости соударения с показателем степени, меньшим двух, привлекалась гипотеза о степенной зависимости предела текучести материала преграды от скорости его деформирования, в настоящей работе указанная взаимосвязь скорости ударника и объема кратера установлена при постоянном значении предела текучести. Физическим обоснованием данного результата является увеличение с ростом скорости соударения доли начальной кинетической энергии ударника, идущей не на пластическое деформирование преграды, а на ее ударно-волновой нагрев.

Что касается глубины кратеров, то ее изменение при увеличении скорости ударников с неизменной кинетической энергией по результатам выполненного численного моделирования в диапазоне скоростей $2 \div 10$ км/с было существенно менее значительным, чем изменение объема кратеров, и в отличие от последнего носило не монотонный характер, а имело точку слабо выраженного максимума. Положение этой точки зависит от прочностных свойств материала преграды и от плотности материала ударника. Кроме того, в отличие от объема кратера, на его глубину заметно влияла плотность материала ударника. С увеличением последней глубина кратера возрастала при одновременном уменьшении его входного диаметра.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Высокоскоростные** ударные явления / под ред. В. Н. Николаевского. — М.: Мир, 1973.
2. **Физика** быстропотекающих процессов / под ред. Н. А. Златина. — М.: Мир, 1976.
3. **Физика** взрыва: в 2 т. / под ред. Л. П. Орленко. — Изд. 3-е, испр. — М.: Физматлит, 2004. — Т. 2.
4. **Orphal D. L.** Explosions and impacts // *Int. J. Impact Eng.* — 2006. — V. 33, N 1-12. — P. 496–545. — <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2006.09.090>.
5. **Катастрофические** воздействия космических тел / под ред. В. В. Адушкина, И. В. Немчинова. — М.: Академкнига, 2005.
6. **Новиков Л. С.** Воздействие твердых частиц естественного и искусственного происхождения на космические аппараты. — М.: Унив. книга, 2009.
7. **Hyde J. L., Christiansen E. L., Kerr J. H.** Meteoroid and orbital debris risk mitigation in a low earth orbit satellite constellation // *Int. J. Impact Eng.* — 2001. — V. 26, N 1-10. — P. 345–356. — [https://doi.org/10.1016/S0734-743X\(01\)00104-X](https://doi.org/10.1016/S0734-743X(01)00104-X).
8. **Аникиева А. П., Мержиевский Л. А., Титов В. М.** Пробивание преград при ударе частиц из стекла, имитирующих каменные метеориты // *ПМТФ.* — 1977. — Т. 18, № 3. — С. 131–136.
9. **Bernhard R. P., Christiansen E. L., Kerr J. H.** Space Shuttle meteoroid and orbital debris impact damage // *Int. J. Impact Eng.* — 2001. — V. 26, N 1-10. — P. 33–38. — [https://doi.org/10.1016/S0734-743X\(01\)00073-2](https://doi.org/10.1016/S0734-743X(01)00073-2).
10. **Christiansen E. L., Kerr J. H.** Ballistic limit equations for spacecraft shielding // *Int. J. Impact Eng.* — 2001. — V. 26, N 1-10. — P. 93–104. — [https://doi.org/10.1016/S0734-743X\(01\)00070-7](https://doi.org/10.1016/S0734-743X(01)00070-7).
11. **Sokolov V. G., Christiansen E. L., Gorbunov A. V., Feldstein V. A., Romanchenkov V. P., Panichkin N. G., Yachlakov Yu. V., Zinchenko L. V.** The effect of thin deployable construction elements of the international space station on the probability of its hull penetration by meteoroids and orbital debris // *Int. J. Impact Eng.* — 2001. — V. 26, N 1-10. — P. 725–734. — [https://doi.org/10.1016/S0734-743X\(01\)00120-8](https://doi.org/10.1016/S0734-743X(01)00120-8).
12. **Мержиевский Л. А., Титов В. М.** Высокоскоростной удар // *Физика горения и взрыва.* — 1987. — Т. 23, № 5. — С. 92–108.
13. **Мержиевский Л. А., Титов В. М.** Пробивание пластин при высокоскоростном ударе // *ПМТФ.* — 1975. — Т. 16, № 5. — С. 102–110.
14. **Мержиевский Л. А.** О скорости осколков, проникающих за экран при высокоскоростном ударе // *Физика горения и взрыва.* — 1981. — Т. 17, № 2. — С. 133–136.

15. **Титов В. М.** Особенности разрушений при ударе метеорита по стеклу // ПМТФ. — 1976. — Т. 17, № 4. — С. 127–130.
16. **Мержиевский Л. А., Титов В. М., Фадеев Ю. И., Швецов Г. А.** Высокоскоростное метание твердых тел // Физика горения и взрыва. — 1987. — Т. 23, № 5. — С. 77–91.
17. **Титов В. М., Фадеев Ю. И., Титова Н. С.** Разгон твердых частиц кумулятивным взрывом // Докл. АН СССР. — 1968. — Т. 180, № 5. — С. 1051–1052.
18. **Титов В. М., Швецов Г. А.** Лабораторные методы высокоскоростного метания твердых тел взрывом // Физика горения и взрыва. — 1970. — Т. 6, № 3. — С. 401–404.
19. **Selivanov V. V., Fedorov S. V., Nikolskaya Ya. M., Ladov S. V.** Compact element formation for the modeling of the high-velocity impacts of particles onto spacecraft materials and construction elements in earth conditions // Acta Astronaut. — 2017. — V. 135. — P. 34–43. — <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2016.10.025>.
20. **Герасимов С. И., Маляров Д. В., Сироткина А. Г., Капинос С. А., Калмыков А. П., Князев А. С.** Взрывные метательные устройства кумулятивного типа для формирования высокоскоростных компактных элементов // Физика горения и взрыва. — 2020. — Т. 56, № 4. — С. 128–136. — DOI: 10.15372/FGV20200413.
21. **Selivanov V. V., Fedorov S. V., Nikolskaya Ya. M., Ladov S. V.** Research of the explosive formation of a compact element for meteoroids fragments and space debris modeling // Acta Astronaut. — 2019. — V. 163, Pt A. — P. 84–90. — <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2019.03.005>.
22. **Selivanov V. V., Gryaznov E. F., Goldenko N. A., Sudomoev A. D., Feldstein V. A.** Numerical simulation and experimental study of explosive projectile devices // Acta Astronaut. — 2017. — V. 135. — P. 56–62. — <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2017.01.042>.
23. **Витман Ф. Ф., Златин Н. А.** Об одной задаче соударения пластичных тел // Докл. АН СССР. — 1962. — Т. 146, № 2. — С. 337–339.
24. **Витман Ф. Ф., Златин Н. А.** О процессе соударения деформируемых тел и его моделировании. I. Состояние и теория вопроса // Журн. техн. физики. — 1963. — Т. 33, № 8. — С. 982–989.
25. **Витман Ф. Ф., Златин Н. А.** О процессе соударения деформируемых тел и его моделировании. II. О моделировании удара шара по полупространству // Журн. техн. физики. — 1963. — Т. 33, № 8. — С. 990–995.
26. **Sun Y., Shi C., Lin Z., Wen D.** Theoretical research progress in high-velocity/hypervelocity impact on semi-infinite targets // Shock and Vibration. — 2015. — ID 265321. — P. 1–15. — <https://doi.org/10.1155/2015/265321>.
27. **Merzhievsky L. A.** Crater formation in a plastic target under hypervelocity impact // Int. J. Impact Eng. — 1997. — V. 20. — P. 557–568. — [https://doi.org/10.1016/S0734-743X\(97\)87444-1](https://doi.org/10.1016/S0734-743X(97)87444-1).
28. **Yu S., Sun G., Tan Q.** Experimental laws of cratering for hypervelocity impacts of spherical projectiles into thick target // Int. J. Impact Eng. — 1994. — V. 15, N 1. — P. 67–77. — [https://doi.org/10.1016/S0734-743X\(05\)80007-7](https://doi.org/10.1016/S0734-743X(05)80007-7).
29. **Мержиевский Л. А.** Развитие идей К. П. Станюковича в задачах высокоскоростного удара // Оборон. техника. — 2016. — № 8-9. — С. 17–20.
30. **Held M.** Theoretical optimum jet diameter profile for maximum penetration // Proc. 17th Int. Symp. on Ballistics, Midrand, South Africa, 1998. — V. 2. — P. 259–265.
31. **Svirsky O. V., Vlasova M. A., Korotkov M. I., Krutyakov V. A., Toropova T. A.** The analytical model ATOS-M for computing of the shaped charge jet penetration parameters // Int. J. Impact Eng. — 2003. — V. 29, N 1-10. — P. 683–690. — <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2003.10.015>.
32. **Свирский О. В., Власова М. А.** О пробивной способности кумулятивных зарядов с конической и полусферической облицовками // Физика горения и взрыва. — 2019. — Т. 55, № 6. — С. 115–119. — DOI: 10/15372/FGV20190616.
33. **Nayhurst C. J., Livingstone I. H.** Advanced numerical simulations for hypervelocity impacts — AUTODYN simulations. — Report R098, Century Dynamics Ltd, 1998.
34. **Федоров С. В.** О реализации принципа имплозии в кумулятивных зарядах с полусферическими облицовками депрессивной толщины // Вестн. МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. Естеств. науки. — 2017. — № 3. — С. 71–92. — DOI: 10.18698/1812-3368-2017-3-71-92.
35. **Федоров С. В., Бабкин А. В., Велданов В. А., Гладков Н. А., Ладов С. В.** О высокоскоростном проникании стержней из пористого материала // Вестн. МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. Естеств. науки. — 2016. — № 5. — С. 18–32. — DOI: 10.18698/1812-3368-2016-5-18-32.
36. **Федоров С. В., Велданов В. А.** Численное моделирование формирования каверны в грунте при воздействии потока высокоскоростных металлических ударников // Журн. техн. физики. — 2006. — Т. 76, № 7. — С. 134–137.
37. **Федоров С. В., Велданов В. А.** Применение сегментированных ударников для формирования каверны в грунтово-скальных преградах // Изв. Рос. акад. ракет. и арт. наук. — 2012. — № 1(71). — С. 43–50.

38. **Fortov V. E., Kim V. V., Lomonosov I. V., Matveichev A. V., Ostrik A. V.** Numerical modeling of hypervelocity impacts // Int. J. Impact Eng. — 2006. — V. 33, N 1-12. — P. 244-253. — <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2006.09.031>.
39. **Walker J. D.** Hypervelocity penetration modeling: momentum vs. energy and energy transfer mechanisms // Int. J. Impact Eng. — 2001. — V. 26, N 1-10. — P. 809-822. — [https://doi.org/10.1016/S0734-743X\(01\)00134-8](https://doi.org/10.1016/S0734-743X(01)00134-8).

Поступила в редакцию 23.09.2020.

После доработки 08.12.2020.

Принята к публикации 19.02.2021.
