

МЕХАНИКА ДЕФОРМИРУЕМОГО ТВЕРДОГО ТЕЛА

УДК 531.58

ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ СКОРОСТИ И ПРОЧНОСТИ УДЛИНЕННЫХ УДАРНИКОВ ИЗ ВЫСОКОПЛОТНОГО СПЛАВА НА ГЛУБИНУ ИХ ПРОНИКАНИЯ В СТАЛЬНУЮ ПРЕГРАДУ

С.В. Федоров¹, В.А. Велданов¹, В.Е. Смирнов²

¹МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация
e-mail: sergfed-64@mail.ru; vevladi@mail.ru

²ФГУП “Научно-исследовательский машиностроительный институт”,
Москва, Российская Федерация
e-mail: nimi@iplipk.ru

На основе численного моделирования в рамках двумерной осесимметричной задачи механики сплошных сред исследовано влияние скорости и прочности материала удлиненных ударников из высокоплотного сплава на глубину их проникания в полубесконечную стальную преграду. Скорость ударников составляла от 1400 до 2000 м/с и соответствовала реализации гидродинамического режима взаимодействия с уменьшением длины ударника в процессе проникания в результате растекания его материала. Расчеты проведены с использованием разработанного вычислительного алгоритма свободных лагранжевых точек, позволяющего моделировать поведение материалов в условиях взрывного и ударного нагружения. Установлено, что зависимость глубины проникания ударника от предела текучести его материала носит немонотонный характер и имеет точку экстремума, соответствующую максимуму пробития. С увеличением скорости ударника экстремум становится менее выраженным и смещается в сторону более высоких значений предела текучести.

Ключевые слова: численное моделирование, удлиненный ударник, тяжелый сплав, стальная преграда, высокоскоростное проникание, гидродинамический режим.

INFLUENCE NUMERICAL ANALYSIS OF VELOCITY AND STRENGTH OF HIGH DENSITY ALLOY ELONGATED PROJECTILES ON THEIR PENETRATION DEPTH INTO THE STEEL TARGET

S.V. Fedorov¹, V.A. Veldanov¹, V.E. Smirnov²

¹Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation
e-mail: sergfed-64@mail.ru; vevladi@mail.ru

²Federal State Unitary Enterprise “Mechanical Engineering Research Institute”,
Moscow, Russian Federation
e-mail: nimi@iplipk.ru

Influence of velocity and material strength of the elongated projectiles from a high density alloy on their penetration depth into a semi-infinite steel target is investigated on the basis of numerical simulation within a two-dimensional axisymmetric problem of continuum mechanics. Projectile velocity was from 1400 to 2000 m/s and corresponded to the implementation of the hydrodynamic regime

of interaction with reduction of the projectile length during the penetration process as a result of its material spreading. Calculations are carried out with use of the developed computing algorithm of the free Lagrangian points, allowing to simulate material behavior for conditions of explosive and shock loading. It is established that dependence of projectile penetration depth from its material yield strength has nonmonotonic character and has the point of an extremum corresponding to penetration depth maximum. With increase in projectile velocity the extremum becomes less expressed and is shifts toward higher values of yield strength.

Keywords: numerical simulation, elongated projectile, heavy alloy, steel target, high-velocity penetration, hydrodynamic regime.

Эффективным средством исследования высокоскоростного ударного взаимодействия материалов являются численные методы механики сплошных сред [1]. В настоящей статье приведены результаты исследований по влиянию скорости и прочности материала удлиненных ударников на их пробивное действие по высокопрочным стальным преградам, полученные на основе численного моделирования. В расчетах был рассмотрен диапазон начальных скоростей взаимодействия от 1400 до 2000 м/с, определяющий гидродинамический режим проникания ударников [2, 3]. При реализации данного режима происходит растекание материала ударника на границе контакта с преградой, так как его прочность оказывается существенно ниже возникающих в области взаимодействия механических напряжений. В результате длина ударника в процессе проникания уменьшается практически до нулевого значения (ударник “срабатывается”) [4, 5]. Исследования проводились применительно к стержням-ударникам из высокоплотных материалов, обеспечивающих высокую эффективность их пробивного действия.

При взаимодействии цилиндрического осесимметричного ударника с преградой по нормали к ее лицевой поверхности соответствующая задача механики сплошных сред может быть рассмотрена в двумерной осесимметричной постановке (рис. 1, а). В цилиндрической системе координат (r, z) движение и состояние деформируемых сред (материалов преграды и ударника) описывается следующей системой уравнений механики сплошных сред [1].

Изменение плотности материалов ρ происходит в соответствии с законом сохранения массы в дифференциальной форме (уравнением неразрывности):

$$\frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dt} + \frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{v_r}{r} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0,$$

где v_r, v_z — радиальная и осевая компоненты вектора скорости частиц материала.

Радиальные и осевые ускорения частиц материала определяются на основании закона сохранения импульса в дифференциальной форме:

$$\rho \frac{dv_r}{dt} = \frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} + \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial z};$$

$$\rho \frac{dv_z}{dt} = \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial r} + \frac{\tau_{rz}}{r},$$

где σ_r , σ_z , σ_θ , τ_{rz} — нормальные и касательные компоненты тензора напряжений.

Определение возникающих в материалах преграды и ударника (металлах) при их деформировании механических напряжений проводится в соответствии с моделью сжимаемой упруго-пластической среды. Компоненты тензора скоростей деформации $\dot{\epsilon}_r$, $\dot{\epsilon}_z$, $\dot{\epsilon}_\theta$, $\dot{\epsilon}_{rz}$ материалов с использованием кинематических соотношений выражаются через компоненты вектора скорости:

$$\dot{\epsilon}_r = \frac{\partial v_r}{\partial r}; \quad \dot{\epsilon}_z = \frac{\partial v_z}{\partial z}; \quad \dot{\epsilon}_\theta = \frac{v_r}{r}; \quad \dot{\epsilon}_{rz} = \frac{\partial v_z}{\partial r} + \frac{\partial v_r}{\partial z}.$$

Определение эволюции напряженного состояния материалов, которые могут претерпевать в рассматриваемой задаче большие пластические деформации, базируется на теории пластического течения [1]. Определяющие уравнения этой теории (уравнения Прандтля – Рейсса) в рассматриваемом случае принимают вид следующих дифференциальных соотношений:

$$\frac{ds_z}{dt} + 2G\dot{\lambda}s_z = 2G \left(\dot{\epsilon}_z + \frac{1}{3\rho} \frac{d\rho}{dt} \right);$$

$$\frac{ds_r}{dt} + 2G\dot{\lambda}s_r = 2G \left(\dot{\epsilon}_r + \frac{1}{3\rho} \frac{d\rho}{dt} \right);$$

$$\frac{ds_\theta}{dt} + 2G\dot{\lambda}s_\theta = 2G \left(\dot{\epsilon}_\theta + \frac{1}{3\rho} \frac{d\rho}{dt} \right);$$

$$\frac{d\tau_{rz}}{dt} + 2G\dot{\lambda}\tau_{rz} = G\dot{\epsilon}_{rz},$$

где s_z , s_r , s_θ — нормальные компоненты девиатора тензора напряжений, G — модуль сдвига среды, $\dot{\lambda}$ — скалярный множитель, определяемый удельной мощностью пластической деформации dA_p/dt и пределом текучести среды σ_Y как

$$\dot{\lambda} = \frac{3}{2\sigma_Y^2} \frac{dA_p}{dt}.$$

При численном решении задач механики упруго-пластических сред удобно использовать упрощенный метод решения уравнений пластического течения Прандтля – Рейсса [6] с использованием так называемой процедуры приведения вектора девиатора тензора напряжений на круг текучести. В соответствии с данным подходом первоначально определялись компоненты девиатора тензора напряжений в предположении упругого поведения материала. Для этого используется следующая система соотношений:

$$\begin{aligned}\frac{ds_z}{dt} &= 2G \left(\dot{\varepsilon}_z + \frac{1}{3\rho} \frac{d\rho}{dt} \right) + \delta_z; \\ \frac{ds_r}{dt} &= 2G \left(\dot{\varepsilon}_r + \frac{1}{3\rho} \frac{d\rho}{dt} \right) + \delta_r; \\ \frac{ds_\theta}{dt} &= 2G \left(\dot{\varepsilon}_\theta + \frac{1}{3\rho} \frac{d\rho}{dt} \right); \\ \frac{d\tau_{rz}}{dt} &= G\dot{\varepsilon}_{rz} + \delta_{rz},\end{aligned}$$

где $\delta_z, \delta_r, \delta_{rz}$ — поправки составляющих девиатора тензора напряжений, связанные с поворотом фиксированного элемента среды как жесткого целого, и рассчитываемые согласно зависимостям

$$\begin{aligned}\delta_z &= \tau_{rz} \left(\frac{\partial v_z}{\partial r} - \frac{\partial v_r}{\partial z} \right); \quad \delta_r = \tau_{rz} \left(\frac{\partial v_r}{\partial z} - \frac{\partial v_z}{\partial r} \right); \\ \delta_{rz} &= \frac{1}{2} (s_z - s_r) \left(\frac{\partial v_r}{\partial z} - \frac{\partial v_z}{\partial r} \right).\end{aligned}$$

Далее выполняется проверка условия пластичности Мизеса с корректировкой в случае необходимости определенных описанным образом компонент девиатора тензора напряжений. Для этого рассчитывается вспомогательная функция

$$J = 2 \left(s_r^2 + s_z^2 + s_\theta^2 + 2\tau_{rz}^2 \right).$$

Если для найденных в предположении упругого поведения материала значений $s_z, s_r, s_\theta, \tau_{rz}$ выполняется условие $J > (2/3) \sigma_Y^2$ (что соответствует состоянию пластического течения материала), то они корректируются путем домножения на $\sqrt{2/(3J)} \sigma_Y$ [6].

С использованием рассчитываемых на основании теории пластического течения значений s_z, s_r, s_θ и давления p в материалах определяются нормальные компоненты тензора напряжений $\sigma_z = s_z - p, \sigma_r = s_r - p, \sigma_\theta = s_\theta - p$, входящие в уравнения радиального и осевого движения частиц материала.

Для расчета давления в металлах в зависимости от их объемной деформации (относительной плотности ρ/ρ_0) широко используется баротропное уравнение в форме Тэта [3]:

$$p = A \left((\rho/\rho_0)^n - 1 \right), \quad (1)$$

где ρ_0 — плотность материала в нормальных условиях (при нулевом давлении), A, n — эмпирические константы материала. При этом влиянием на давление внутренней энергии материала в условиях взаимодействия металлических ударников с металлическими преградами

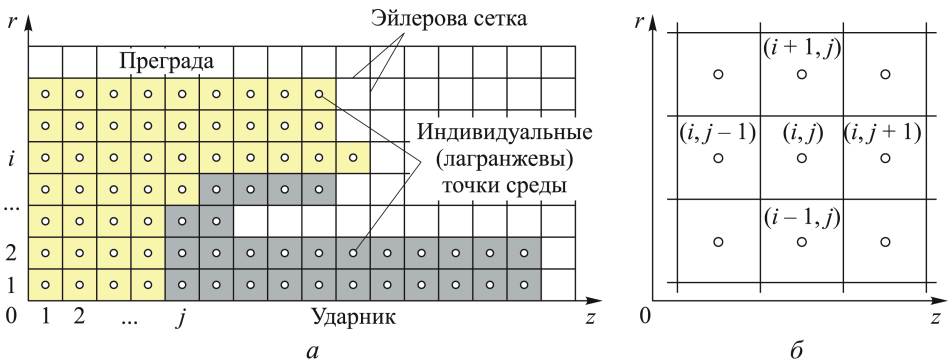


Рис. 1. Расчетная схема метода свободных лагранжевых точек:

a — дискретизация расчетной области; *б* — шаблон конечно-разностной схемы

со скоростями порядка одного-двух километров в секунду можно пренебречь.

Граничные условия в рассматриваемой задаче (рис. 1, *a*) являются следующими. На оси симметрии ($r = 0$) полагается отсутствующей радиальная составляющая скорости частиц среды ($v_r = 0$). На свободных поверхностях материалов преграды и ударника задаются нулевыми механическими напряжениями. На поверхности контакта ударника и преграды должно выполняться условие равенства нормального и касательного напряжений во взаимодействующих материалах.

При задании начальных условий предполагается, что материал преграды покоится и невозмущен (нулевыми задаются скорости и все компоненты напряженно-деформированного состояния). Материал ударника в начальный момент времени также полагается невозмущенным (с равенством нулю всех компонентов напряженно-деформированного состояния). При этом во всем объеме материала ударника при $t = 0$ задается одинаковая скорость v_0 , ориентированная вдоль оси z .

Для численного решения сформулированной задачи использовался вычислительный алгоритм, основанный на методе свободных лагранжевых точек [7, 8].

Суть используемого численного метода заключается в следующем [9]. В расчетной области вводится неподвижная эйлерова сетка с прямоугольными ячейками размером Δr в радиальном и Δz в осевом направлениях (см. рис. 1, *a*). В те ячейки эйлеровой сетки, которые оказываются внутри области расчетного поля, занятой средой, помещаются индивидуальные (лагранжевы) точки среды. Индивидуальные точки не имеют размеров и массы, в данных точках определены все параметры среды: радиальная и осевая компоненты вектора скорости, плотность, компоненты тензора напряжений. Каждая точка характеризуется радиальной и осевой координатами.

Ячейки эйлеровой сетки индивидуализируются постановкой каждой из них в соответствие пары целых чисел (i, j) , где i — номер данной ячейки в радиальном направлении, а j — в осевом (см.

рис. 1, а). Той же парой чисел будем индексировать и все параметры среды в индивидуальной (лагранжевой) точке, находящейся в данный момент времени в эйлеровой ячейке (i, j) . Для определения эволюции параметров в лагранжевой точке, находящейся в данный момент времени в ячейке эйлеровой сетки (i, j) , используются параметры лагранжевых точек из четырех соседних эйлеровых ячеек: ячейки снизу $(i - 1, j)$, ячейки сверху $(i + 1, j)$, ячейки справа $(i, j + 1)$ и ячейки слева $(i, j - 1)$ (рис. 1, б). Если какие-либо из данных эйлеровых ячеек оказываются пустыми (не занятыми средой), то в них считаются находящимися фиктивные точки, имеющие такие же компоненты вектора скорости, что и рассматриваемая индивидуальная точка (i, j) , при нулевом давлении. Введение фиктивных лагранжевых точек позволяет единым образом рассчитывать эволюцию параметров всех индивидуальных точек независимо от количества имеющихся у них соседей.

Например, новое значение плотности $\rho_{(i,j)}^*$ (в момент времени $t + \Delta t$) в лагранжевой точке, находящейся в момент времени t в ячейке эйлеровой сетки (i, j) , определяется из разностного аналога уравнения неразрывности

$$\rho_{(i,j)}^* = \rho_{(i,j)} \left(1 - \Delta t \left(\frac{v_{r(i+1,j)} - v_{r(i-1,j)}}{r_{(i+1,j)} - r_{(i-1,j)}} + \frac{v_{r(i+1,j)} + v_{r(i-1,j)}}{r_{(i+1,j)} + r_{(i-1,j)}} + \frac{v_{z(i,j+1)} - v_{z(i,j-1)}}{z_{(i,j+1)} - z_{(i,j-1)}} \right) \right).$$

Аналогичным образом из разностных аналогов соответствующих уравнений могут быть определены и все остальные параметры движения и состояния среды на новом временном слое.

Далее определяются новые радиальная и осевая координаты индивидуальных точек

$$r_{(i,j)}^* = r_{(i,j)} + \Delta t v_{r(i,j)};$$

$$z_{(i,j)}^* = z_{(i,j)} + \Delta t v_{z(i,j)},$$

в соответствии с которыми проводится процедура перераспределения индивидуальных точек по ячейкам эйлеровой сетки. Для каждой индивидуальной точки определяются новые номера i и j эйлеровой ячейки, в которой она оказывается на новом временном слое. При этом, если в какую-либо ячейку эйлеровой сетки попадает несколько индивидуальных точек, то все эти точки заменяются одной с присвоением ей параметров, усредненных по параметрам “сосытковавшихся” точек. Исключение составляют точки, находящиеся на границе, занятой средой (эйлеровы ячейки, в которых расположены эти точки, имеют среди окружающих соседних ячеек хотя бы одну пустую). Если в одной эйлеровой ячейке оказывается несколько индивидуальных точек,

одна из которых является граничной, то в расчете используется только граничная точка, а остальные из дальнейшего расчета исключаются.

После перераспределения индивидуальных точек по ячейкам эйлеровой сетки описанная вычислительная процедура повторяется. Для сквозного расчета ударных волн в рассмотренную схему вводится искусственная вязкость [1], дающая в случае сжатия среды в лагранжевой точке слагаемое, добавляемое к действующему в данной точке гидродинамическому давлению (используется комбинация линейной и квадратичной искусственной вязкости).

Шаг численного интегрирования по времени Δt на основании условия устойчивости Куранта [1] выбирается удовлетворяющим неравенству

$$\Delta t < \min_{(i,j)} \frac{\Delta l}{c_{(i,j)} + \sqrt{v_{r(i,j)}^2 + v_{z(i,j)}^2}},$$

где $c_{(i,j)}$ — скорость звука в лагранжевых точках, Δl — меньшее значение из шагов эйлеровой сетки по радиальной Δr и осевой Δz координатам (обычно используется эйлерова сетка с квадратными ячейками, так что $\Delta r = \Delta z$).

Описанный вычислительный алгоритм реализован в разработанном в МГТУ им. Н.Э. Баумана программном комплексе для численного моделирования взрывных и ударных процессов “ЭРУДИТ” (Эвристический Расчет Упорядоченного Движения Индивидуальных Точек), с использованием которого и проводились представленные в настоящей работе исследования. Приведенный вычислительный метод был апробирован при решении широкого круга задач взрывного и ударного нагружения сплошных сред (в том числе и задач проникания) и хорошо себя зарекомендовал [10–12]. К числу его достоинств следует отнести возможность расчета движений сплошной среды с большими деформациями без использования специальных процедур перестройки расчетной сетки.

Для пробития преград из высокопрочной стали значительной толщины (свыше 500 мм) применяются удлиненные металлические ударники, имеющие скорость на уровне 1500 м/с. Как уже отмечалось, проникание таких ударников в преграду происходит в гидродинамическом режиме (с растеканием материала ударника в зоне контакта с преградой и соответствующим уменьшением его длины в процессе проникания). В соответствии с гидродинамической теорией проникания [2] определяющее влияние на глубину каверны в преграде оказывают длина ударника и плотность его материала. Для увеличения глубины проникания необходимо использовать удлиненные ударники из высокоплотных материалов. К числу подобных материалов относятся прежде всего тяжелые сплавы типа ВНЖ (композиции на

основе вольфрама, никеля и железа) [13, 14]. Указанные сплавы, помимо высокой плотности (от 16,9 до 18,7 г/см³), обладают необходимым комплексом других физико-механических свойств, позволяющих рассматривать их в качестве одного из основных материалов для изготовления ударников с высокой проникающей способностью. К числу данных свойств относятся высокая пластичность (относительное удлинение до 20 %), высокие пределы прочности (свыше 1000 МПа) и текучести (до 900...1000 МПа).

С учетом сказанного представляло интерес провести численный анализ пробивного действия удлинённых ударников из сплавов ВНЖ. Для этого необходимо иметь кривую динамического сжатия сплава, описывающую зависимость давления в нем от его плотности. Свойство сжимаемости материалов, хотя и не в очень значительной степени, но оказывает влияние на процесс проникания удлинённых ударников в гидродинамическом режиме [15, 16]. Поэтому от корректного выбора зависимостей $p(\rho)$ для материалов преграды и ударника в определенной степени зависит адекватность результатов численного моделирования реальному физическому процессу.

Уравнение динамической сжимаемости такой многокомпонентной композиции, как сплав ВНЖ, может быть построено на основании уравнений сжимаемости для отдельных компонентов [17]. Определяя общую объемную деформацию многокомпонентного материала как сумму объемных деформаций отдельных компонентов и используя предположение о равенстве давлений во всех компонентах, взаимосвязь между плотностью и давлением в композиции ВНЖ можно представить в виде:

$$\frac{\rho_0}{\rho} = \sum_{i=1}^3 \alpha_i \left(1 + \frac{p}{A_i} \right)^{-1/n_i}, \quad (2)$$

где величины α_i характеризуют фазовый состав тяжелого сплава и соответствуют объемной концентрации вольфрама, никеля и железа (очевидно, должно выполняться соотношение $\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 = 1$); A_i и n_i — параметры в уравнениях сжимаемости в форме Тэта (1) для каждого отдельно взятого компонента. При известном фазовом составе нормальная плотность тяжелого сплава ρ_0 определяется, как $\rho_0 = \alpha_1 \rho_{10} + \alpha_2 \rho_{20} + \alpha_3 \rho_{30}$, где $\rho_{10} = 19350$ кг/м³, $\rho_{20} = 8870$ кг/м³, $\rho_{30} = 7850$ кг/м³ — нормальные плотности отдельно взятых соответственно вольфрама, никеля и железа. Значения эмпирических коэффициентов в уравнениях сжимаемости для данных материалов, необходимые для получения уравнения сжимаемости высокоплотной композиции ВНЖ, приведены в таблице [18].

**Эмпирические коэффициенты в уравнениях сжимаемости компонентов
тяжелого сплава ВНЖ**

Материал	A , ГПа	n
Вольфрам	94,6	3,42
Никель	45,3	4,507
Железо	19,5	5,642

В расчетах в качестве материала удлиненного ударника рассматривался сплав ВНЖ-90 [14] с массовыми долями вольфрама, никеля и железа соответственно $\mu_1 = 90\%$, $\mu_2 = 7\%$, $\mu_3 = 3\%$. Плотность данного сплава ρ_0 в нормальных условиях, определявшаяся с использованием соотношения

$$\frac{1}{\rho_0} = \frac{\mu_1}{\rho_{10}} + \frac{\mu_2}{\rho_{20}} + \frac{\mu_3}{\rho_{30}},$$

составляла $\rho_0 = 17170 \text{ кг/м}^3$. Объемные доли компонентов α_i в сплаве ВНЖ-90, необходимые для построения кривой динамического сжатия сплава (2), были рассчитаны согласно зависимостям $\alpha_i = \mu_i \rho_0 / \rho_{i0}$. Они имели следующие значения: $\alpha_1 = 79,9\%$ (для вольфрама); $\alpha_2 = 13,5\%$ (для никеля) и $\alpha_3 = 6,6\%$ (для железа).

Построенное уравнение динамической сжимаемости сплава ВНЖ-90 в виде (2) не позволяет получить явное выражение для давления p в материале в зависимости от его плотности ρ , что делает данное уравнение неудобным для использования в методике численного моделирования (возникает необходимость организации отдельной процедуры численного определения давления на базе этой зависимости, что заметно увеличивает время расчета). В целях устранения данной проблемы зависимость (2) аппроксимировали уравнением сжимаемости в форме Тэта (1) с соответствующим подбором эмпирических коэффициентов A и n . Для определения этих коэффициентов предварительно рассчитывали скорость звука в сплаве в нормальных условиях

$$c_0 = \sqrt{\left. \frac{dp}{d\rho} \right|_{p=0}}.$$

При использовании зависимости $p(\rho)$ в виде (2) значение c_0 определяется из соотношения

$$\frac{1}{\rho_0 c_0^2} = \sum_{i=1}^3 \frac{\alpha_i}{\rho_{i0} c_{i0}^2},$$

где c_{i0} — скорости звука в компонентах сплава в нормальных условиях, определяемые, в свою очередь, на базе (1) как $c_{i0} = \sqrt{n_i A_i / \rho_{i0}}$. Расчет дал для скорости звука в сплаве ВНЖ-90 в нормальных условиях значение $c_0 = 3950 \text{ м/с}$. С другой стороны, выражение для c_0 с использованием аппроксимирующего уравнения сжимаемости $p(\rho)$ в форме

Тэта (1) записывается в виде $c_0 = \sqrt{nA/\rho_0}$, что позволяет установить взаимосвязь между подлежащими определению коэффициентами A и n : $A = \rho_0 c_0^2/n$. В результате уравнение (1) может быть переписано в виде

$$p = \frac{\rho_0 c_0^2}{n} \left[\left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^n - 1 \right],$$

где неопределенным остается значение лишь одного коэффициента n . Выбор значения данного коэффициента был проведен из условия минимального отклонения зависимости (1) от уравнения динамической сжимаемости многокомпонентного материала (2), содержащего вольфрам, никель и железо в заданных пропорциях. При этом рассматривался диапазон давлений от 0 до 40 ГПа, перекрывавший область возможных давлений, реализующихся при взаимодействии материалов со скоростями 1000...2000 м/с.

В итоге при проведении численных расчетов было использовано уравнение динамической сжимаемости сплава ВНЖ-90 в форме Тэта (1) с коэффициентами $A = 57,1$ ГПа; $n = 4,7$. Как показал сравнительный анализ различных кривых динамической сжимаемости рассматриваемого материала, при указанных значениях коэффициентов уравнение в форме Тэта (1) дает результаты, практически совпадающие с получаемыми на основании зависимости (2) для многокомпонентной среды.

В расчетах был рассмотрен цилиндрический ударник из сплава ВНЖ-90 длиной $l_0 = 500$ мм и диаметром $d_0 = 24$ мм (удлинение $l_0/d_0 \approx 21$). Преграда предполагалась стальной с прочностными характеристиками, соответствующими стальным преградам средней твердости (предел текучести стали принимался равным 1000 МПа). Динамическая сжимаемость стальной преграды описывалась уравнением в форме Тэта (1) с коэффициентами $A = 19,5$ ГПа; $n = 5,642$ [18]. Толщина преграды составляла 800 мм, ее поперечный размер (диаметр) – 320 мм.

При исследовании влияния на характеристики проникания в преграду прочностных свойств материала ударника его предел текучести σ_Y принимался равным 50; 500; 1000 и 1500 МПа.

На рис. 2 приведены результирующие формы каверн, полученных в стальных преградах при проникании удлиненных стержней из сплава ВНЖ-90 при различных его пределах текучести и начальной скорости взаимодействия $v_0 = 1600$ м/с. Полученные при варьировании начальной скорости ударников результаты обобщаются на рис. 3 кривыми зависимостей глубины проникания L (глубины каверны в преграде, отсчитываемой от начального положения ее свободной поверхности) от начальной скорости ударника v_0 и предела текучести его материала σ_Y . Анализ представленных данных свидетельствует об относительно небольшом влиянии прочностных свойств материала ударника

(его предела текучести) на глубину проникания при рассмотренных скоростях взаимодействия. Так, при скорости $v_0 = 1400$ м/с разность между максимальным и минимальным пробитием для диапазона изменения предела текучести материала ударника σ_Y от 50 до 1500 МПа не превышает 10% (максимальное пробитие — 560 мм, минимальное — 510 мм). С повышением скорости взаимодействия влияние предела текучести материала ударника становится еще слабее. Изменение глубины проникания в зависимости от значения σ_Y материала ударника в случае $v_0 = 2000$ м/с составляет около 7%.

Однако заслуживает внимания “необычный” характер влияния прочностных свойств материала ударника на глубину проникания, наиболее контрастно проявляющийся при скорости $v_0 = 1400$ м/с (см. рис. 3). “Необычность” заключается в наличии экстремума — с увеличением значения σ_Y глубина пробития сначала возрастает, а затем начинает уменьшаться. Отмеченный характер поведения глубины проникания L в зависимости от предела текучести материала ударника сохраняется и при начальных скоростях взаимодействия 1600 и 1800 м/с. При этом с повышением скорости точка максимума смещается в сторону больших значений σ_Y . При $v_0 = 2000$ м/с глубина каверны с ростом значения σ_Y в рассмотренном диапазоне от 50 до 1500 МПа монотонно возрастает, однако, очевидно, при дальнейшем увеличении предела текучести материала ударника (сверх 1500 МПа) также должно наступить снижение L .

При скорости $v_0 = 1400$ м/с глубина пробития практически лишена прочности ударника ($\sigma_Y = 50$ МПа) оказывается больше, чем в случае $\sigma_Y = 1500$ МПа ($L = 540$ мм против $L = 510$ мм, рис. 3). Очевидно, обнаруженный в ходе численного моделирования “необычный” эффект требует своего физического обоснования. Это обоснование может быть дано с привлечением соображений энергетического характера. Известно, что объем каверны, формирующейся в преграде при высокоскоростном проникании ударника, зависит от его кинетической энергии [19]. Как следует из рис. 2, с увеличением предела

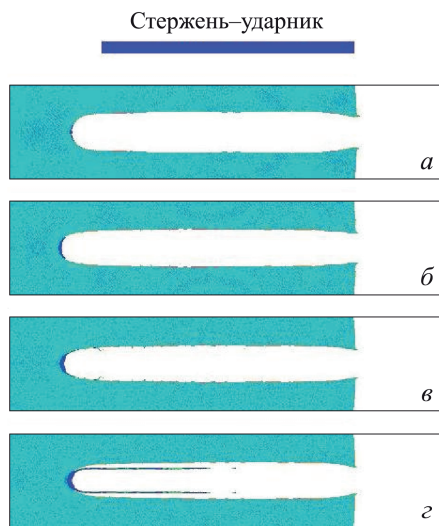


Рис. 2. Форма каверны в стальной преграде при проникании удлиненных ударников из сплава ВНЖ-90 с различными значениями предела текучести при начальной скорости взаимодействия 1600 м/с:

a-z — $\sigma_Y = 50; 500; 1000; 1500$ МПа соответственно

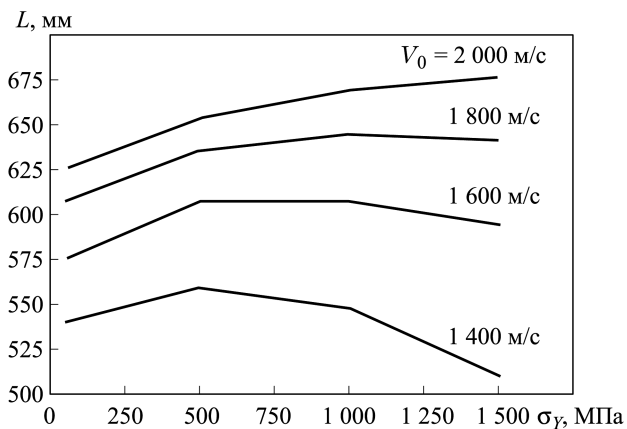


Рис. 3. Влияние скорости и предела текучести материала на глубину проникновения удлиненных ударников из сплава ВНЖ-90 в стальную преграду

текучести материала ударника при неизменном значении его скорости происходит некоторое уменьшение поперечных размеров каверны (это связано, очевидно, с затруднением растекания материала ударника в поперечном направлении на границе контакта с преградой ввиду действия прочностных сил). Уменьшение же поперечных размеров каверны при условии неизменности ее объема должно приводить к возрастанию глубины проникания. Этим обстоятельством, как представляется, и обусловлен первоначальный рост значения L с увеличением предела текучести материала ударника — более прочный ударник слабее деформируется в радиальном направлении и вследствие этого тратит меньше энергии на радиальное расширение каверны. Последующее снижение глубины проникания с повышением прочности материала ударника может быть связано с увеличением доли энергии, расходуемой на пластическое деформирование самого ударника.

Следует отметить, что в используемой модели проникания удлиненных ударников не учитывалась возможность разрушения материалов ударника и преграды, имеющего место в реальных условиях. Однако, как представляется, дополнительный учет данного обстоятельства не должен существенным образом повлиять на зафиксированный в расчетах характер влияния прочности материала ударника на глубину его проникания. Дело в том, что разрушение не может происходить непосредственно в области проникания (области контакта материалов ударника и преграды с радиальным размером, соответствующим радиусу ударника), так как в ней в материалах реализуется напряженное состояние всестороннего сжатия. Предпосылки для реализации разрушения (и это подтверждается экспериментальными данными) возникают, когда растекающийся из зоны проникания в радиальном направлении материал ударника принимает форму тонкой пелены, практически уже прекращая свое интенсивное пластическое деформирование. Состояние материала в этой пелене (сохранение им сплошности или его

разрушение) малосущественно с точки зрения его влияния на процесс проникания.

Подводя итог рассмотрению влияния предела текучести материала ударника на характеристики проникания, отметим, что реальные значения σ_Y для сплава ВНЖ-90 (на уровне 1000 МПа) близки к оптимальным, при которых обеспечивается максимум глубины проникания (см. рис. 3).

Как видно на рис. 3, более существенное влияние на глубину проникания по сравнению с прочностью материала ударника оказывает его скорость. Для ударника из сплава ВНЖ-90 с пределом текучести 1000 МПа повышение его скорости с 1400 до 2000 м/с приводит к увеличению на 125 мм глубины каверны (с $L = 545$ мм до $L = 670$ мм), что составляет примерно 23 %. Одновременно с увеличением скорости заметно возрастают и поперечные размеры каверны.

Следует отметить, что гидродинамический предел глубины проникания (определяемый на основании гидродинамической теории проникания [2] длиной ударника и соотношением его плотности с плотностью преграды) для рассматриваемого ударника из сплава ВНЖ-90 длиной $l_0 = 500$ мм при действии по стальной преграде составляет около 740 мм. Таким образом, глубина проникания при $v_0 = 2000$ м/с еще примерно на 10 % ниже своего гидродинамического предела.

На рис. 4 полями плотностей материалов для различных моментов времени проиллюстрировано проникание в стальную преграду стержней-ударников длиной $l_0 = 500$ мм из сплава ВНЖ-90 с характерным для него значением предела текучести ($\sigma_Y = 1000$ МПа) при начальных скоростях $v_0 = 1400$ м/с (рис. 4, а) и $v_0 = 2000$ м/с (рис. 4, б). Представленные результаты свидетельствуют о реализации в обоих случаях гидродинамических режимов проникания с полным “срабатыванием” ударников в результате растекания их материала на границе контакта с формируемой в преграде каверной.

На рис. 5 и 6 динамика проникания рассматриваемых в расчетах удлинённых ударников из сплава ВНЖ-90 дополнительно иллюстрируется временными зависимостями глубины проникания L , текущей длины ударника l , скорости заднего торца ударника v_e , скорости проникания v_c и осевого напряжения σ_{zc} на границе контакта с преградой, построенными для следующих вариантов начальных скоростей v_0 и пределов текучести σ_Y материала ударника: $v_0 = 1400$ м/с, $\sigma_Y = 50$ МПа (рис. 5, а); $v_0 = 1400$ м/с, $\sigma_Y = 1500$ МПа (рис. 5, б); $v_0 = 2000$ м/с, $\sigma_Y = 1000$ МПа (рис. 6).

Из сравнения данных, представленных на рис. 5, следует заметное отличие в динамике изменения параметров проникания ударника, практически лишенного прочности ($\sigma_Y = 50$ МПа, см. рис. 5, а), и очень прочного ударника ($\sigma_Y = 1500$ МПа, см. рис. 5, б) при одной и

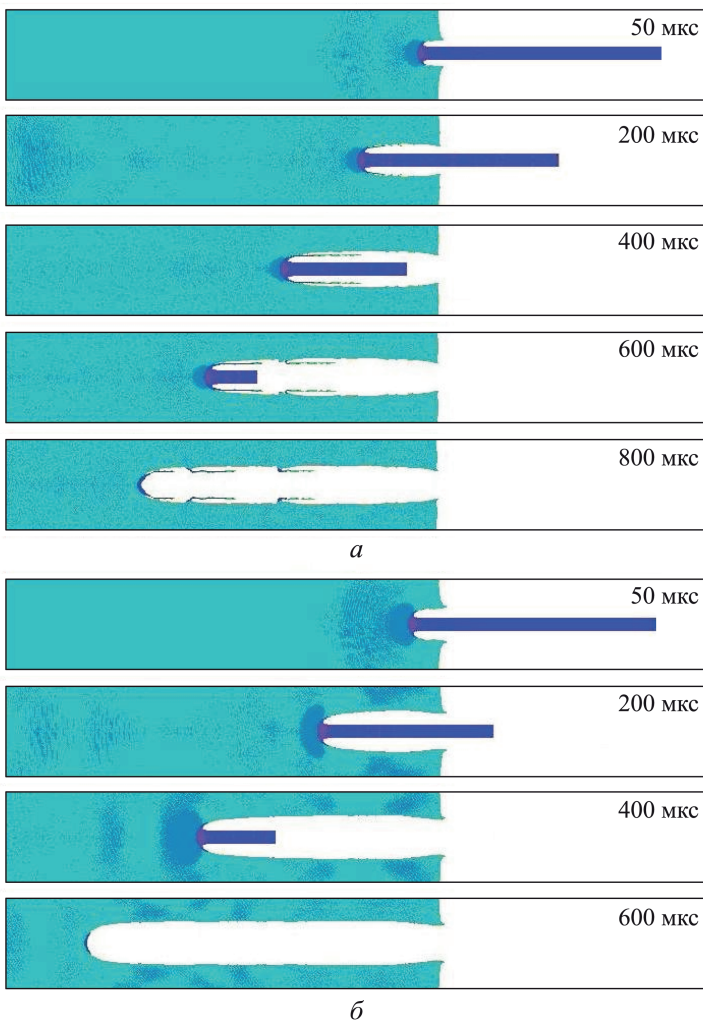


Рис. 4. Проникание в стальную преграду удлиненных ударников из сплава ВНЖ-90 с пределом текучести 1000 МПа при различных начальных скоростях взаимодействия:

$a - v_0 = 1400 \text{ м/с}$; $b - v_0 = 2000 \text{ м/с}$

той же начальной скорости. Скорость заднего торца v_e и скорость границы контакта с преградой v_c для малопрочного ударника остаются практически постоянными на всем протяжении процесса проникания, их резкое снижение до нулевого значения наблюдается только с момента, когда длина ударника сокращается до значения порядка его диаметра (см. рис. 5, *a*). Напротив, в случае высокопрочного ударника заметное снижение скоростей v_e и v_c наблюдается уже на ранних стадиях процесса (см. рис. 5, *б*). Отмеченное обстоятельство согласуется с моделью проникания ударников-стержней Алексеевского – Тейта [4, 5]. Падение скорости “несработавшейся” части высокопрочного ударника в процессе проникания приводит, в свою очередь, к уменьшению контактных напряжений σ_{zc} на границе с преградой (см. рис. 5, *б*). Для

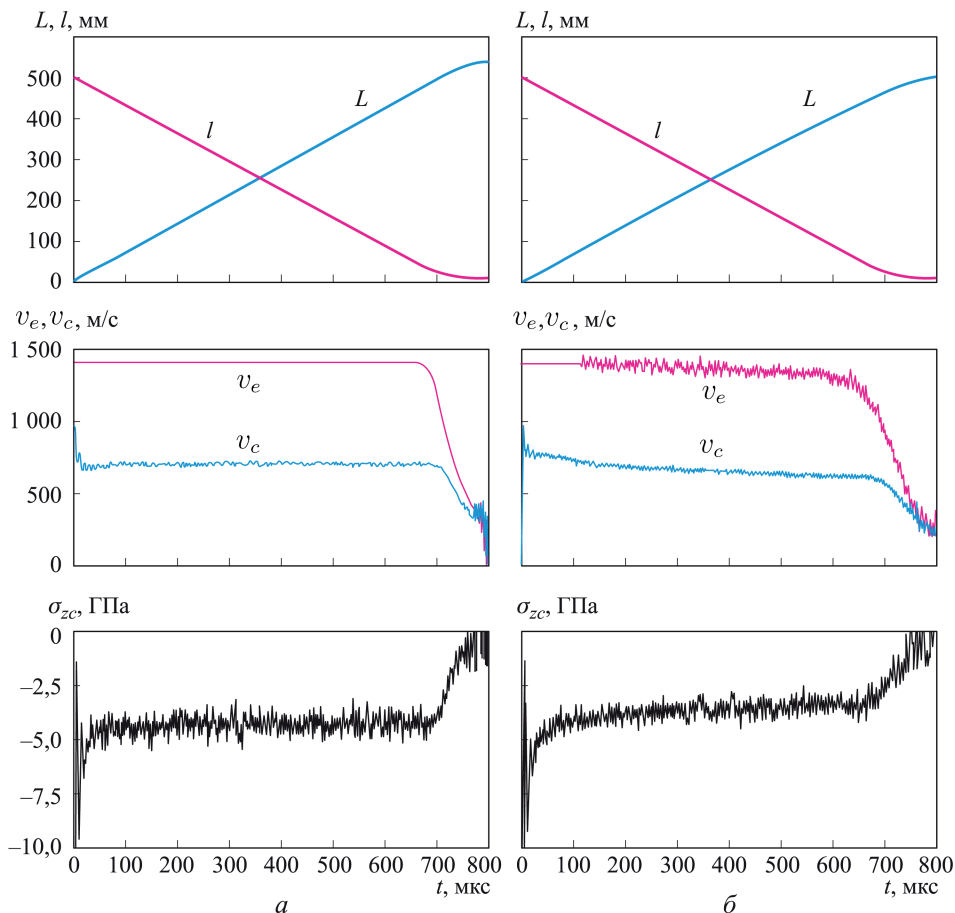


Рис. 5. Изменение параметров при проникании в стальную преграду стержня из сплава ВНЖ-90 с пределом текучести 50 МПа (а) и 1500 МПа (б) при начальной скорости взаимодействия 1400 м/с

малопрочного ударника эти напряжения остаются примерно постоянными вплоть до полного истощения длины ударника (см. рис. 5, а). Проведенный анализ позволяет еще раз оттенить физические причины более высокого пробивного действия ударника с пределом текучести материала $\sigma_Y = 50$ МПа по сравнению со случаем $\sigma_Y = 1500$ МПа, зафиксированного при скорости взаимодействия $v_0 = 1400$ м/с.

При повышении скорости ударника до $v_0 = 2000$ м/с достаточно высокое значение предела текучести его материала ($\sigma_Y = 1000$ МПа) уже не приводит к заметному торможению еще “несработавшейся” части ударника (см. рис. 6). При этом отношение скорости проникания v_c к начальной скорости ударника v_0 при $v_0 = 2000$ м/с оказывается заметно выше, чем при $v_0 = 1400$ м/с, что связано, очевидно, со снижением роли прочностного сопротивления преграды с увеличением скорости взаимодействия. Контактные напряжения σ_{zc} на границе с преградой при увеличении скорости взаимодействия от 1400 до 2000 м/с возрастают почти в 2 раза (примерно от 4 до 7,5 ГПа).

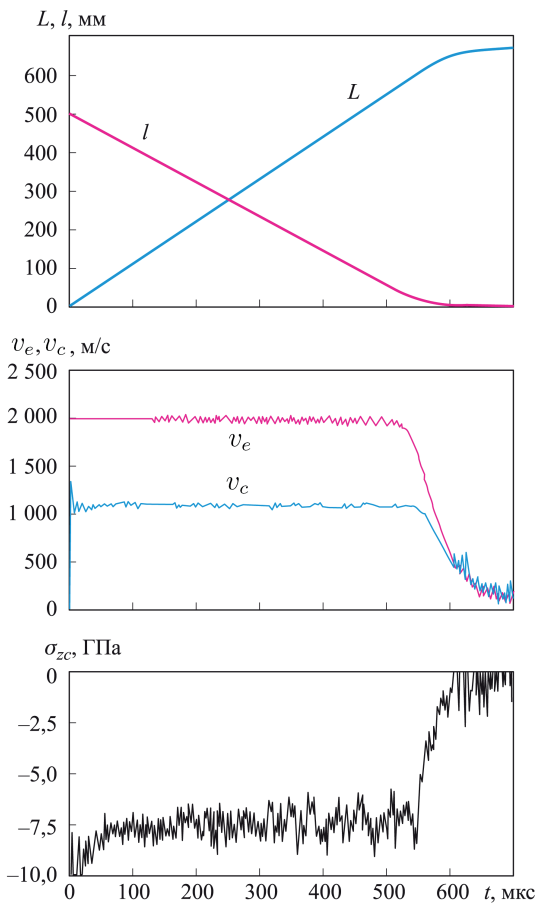


Рис. 6. Изменение параметров при проникании в стальную преграду стержня из сплава ВНЖ-90 с пределом текучести 1000 МПа при начальной скорости взаимодействия 2000 м/с

При этом в обоих случаях они заметно превышают предел текучести материала ударников, что и предопределяет реализацию гидродинамических режимов проникания.

В целом результаты проведенного численного моделирования свидетельствуют о незначительном влиянии прочности материала удлиненных ударников из высокоплотного сплава на их проникающую способность при скоростях взаимодействия на уровне 1500 м/с и более. Поэтому при разработке технологического процесса получения стержней-ударников из высокоплотных сплавов нет необходимости предпринимать специальные меры по повышению прочностных свойств материала до максимально возможного предела. Напротив, как показывают расчеты, чрезмерно высокое значение предела текучести материала удлиненного ударника может приводить даже к некоторому снижению его проникающей способности.

В соответствии с результатами численного моделирования зависимость глубины проникания ударника от предела текучести его ма-

териала носит немонотонный характер и имеет слабо выраженный экстремум, соответствующий максимуму пробития.

Работа выполнена при финансовой поддержке со стороны Минобрнауки России в рамках базовой части государственного задания образовательным организациям высшего образования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бабкин А.В., Колпаков В.И., Охитин В.Н., Селиванов В.В. Прикладная механика сплошных сред: В 3 т. Т. 3. Численные методы в задачах физики взрыва и удара. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000. 516 с.
2. Сагомонян А.Я. Проникание. М.: Изд-во МГУ им. М.В. Ломоносова, 1974. 300 с.
3. Фомин В.М., Гулидов А.И., Сапожников Г.А. Высокоскоростное взаимодействие тел. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1999. 600 с.
4. Алексеевский В.П. К вопросу о проникании стержня в преграду с большой скоростью // Физика горения и взрыва. 1966. Т. 2. № 2. С. 99–106.
5. Tate A. A theory for the deceleration of long rods after impact // J. Mech. Phys. Solids. 1967. Vol. 15. No. 6. P. 387–399.
6. Уилкинс М.Л. Расчет упругопластических течений: Вычислительные методы в гидродинамике. М.: Мир, 1967. С. 212–263.
7. Оран Э., Борис Дж. Численное моделирование реагирующих потоков. М.: Мир, 1990. 660 с.
8. Федоров С.В. О возможности “отсечки” лидирующего высокоскоростного участка металлической струи при взрыве кумулятивного заряда в аксиальном магнитном поле // Боеприпасы и высокоэнергетические конденсированные системы. 2008. № 2. С. 73–80.
9. Велданов В.А., Марков В.А., Пусев В.И. и др. Расчет проникания недеформируемых ударников в малопрочные преграды с использованием данных пьезоакселерометрии // ЖТФ. 2011. Т. 81, Вып. 7. С. 94–104.
10. Федоров С.В., Велданов В.А. Численное моделирование формирования каверны в грунте при воздействии потока высокоскоростных металлических ударников // ЖТФ. 2006. Т. 76. Вып. 7. С. 134–137.
11. Федоров С.В. К определению глубины проникания пористых ударников при гиперсверхзвуковом взаимодействии // ЖТФ. 2007. Т. 77. Вып. 10. С. 131–134.
12. Федоров С.В., Велданов В.А. К определению размеров кавитационной полости в воде за движущимся с высокой скоростью цилиндрическим телом // ЖТФ. 2013. Т. 83. Вып. 2. С. 15–20.
13. Magness L.S., Kapoor D. Tungsten composite materials with alternative matrices for ballistics applications // Proc. of the Fifth Intern. Conf. on Tungsten, Hard Metals and Refractory Alloys. Princeton, N. Jersey, 2000. P. 15–23.
14. Поварова К.Б., Макаров П.В., Ратнер А.Д. и др. Тяжелые сплавы типа ВНЖ-90. Влияние легирования и режимов получения порошков вольфрама на их строение, микроструктуру и свойства спеченных сплавов // Металлы. 2002. № 4. С. 39–48.
15. Златин Н.А. О роли сжимаемости в процессе динамического деформирования пластичных тел // Некоторые проблемы прочности твердого тела. М.–Л.: Изд-во АН СССР, 1959. С. 222–229.
16. Федоров С.В., Баянова Я.М. Особенности гидродинамического режима проникания удлиненных ударников с учетом сжимаемости материалов // ЖТФ. 2011. Т. 81. Вып. 9. С. 45–51.
17. Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред. М.: Наука, 1987. 464 с.

18. Методы исследования свойств материалов при интенсивных динамических нагрузках / под ред. М.В. Жерноклетова. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2005. 428 с.
19. *Высокоскоростные ударные явления* / под ред. В.Н. Николаевского. М.: Мир, 1973. 538 с.

REFERENCES

- [1] Babkin A.V., Kolpakov V.I., Okhitin V.N., Selivanov V.V. *Prikladnaya mekhanika sploshnykh sred. V 3 t. T. 3. Chislennyye metody v zadachakh fiziki vzryva i udara* [Applied continuum mechanics. In 3 vol. Vol. 3. Numerical methods in problems of physics of explosion and shock]. Moscow, MGU im. N.E. Bauman Publ., 2000. 516 p.
- [2] Sagomonyan A.Ya. *Pronikanie* [Penetration]. Moscow, MGU Publ., 1974. 300 p.
- [3] Fomin V.M., Gulidov A.I., Sapozhnikov G.A. *Vysokoskorostnoye vzaimodeystvie tel* [High-speed interaction of bodies]. Novosibirsk, Izd. SO RAN Publ., 1999. 600 p.
- [4] Alekseevskiy V.P. On the penetration of the rod into the target at high velocity. *Fiz. Goreniya Vzryva* [Combust., Explos., Shock Waves], 1966, vol. 2, no. 2, pp. 99–106 (in Russ.).
- [5] Tate A. A theory for the deceleration of long rods after impact. *J. Mech. Phys. Solids*, 1967, vol. 15, no. 6, pp. 387–399.
- [6] Wilkins M.L. Alder B., Fernbach S., Retenberg M., eds. *Calculation of elastic-plastic flow, methods of computational physics*. New York, Academic Press, 1964. (Russ. Ed.: Uilkins M.L. Raschet uprugoplasticheskikh techeniy: Vychislitel'nyye metody v gidrodinamike. Per. s angl. Moscow, Mir Publ., 1967, pp. 212–263.).
- [7] Oran E.S., Boris J.P. *Numerical simulation of reactive flow*. 2nd Ed. Cambridge Uni. Press, Naval Research Laboratory Publ., 2001. 522 p. (Russ. Ed.: Oran E., Boris Dzh. Chislennoye modelirovaniye reagiruyushchikh potokov. Per. s angl. Moscow, Mir Publ., 1990. 660 p.).
- [8] Fedorov S.V. On the possibility of “cutoff” of the leading high-velocity portion of the metal jet in the explosion of a shaped charge in the axial magnetic field. *Boepripsy i vysokoenergeticheskie kondensirovannyye sistemy* [Explosives and high energy condensed system], 2008, no. 2, pp. 73–80 (in Russ.).
- [9] Veldanov V.A., Markov V.A., Pusev V.I., Ruchko A.M., Sotskiy M.Yu., Fedorov S.V. Computation of nondeformable striker penetration into low-strength obstacles using piezoelectric accelerometry data. *Zh. Tekh. Fiz.* [Tech. Phys. The Russ. J. Appl. Phys.], 2011, vol. 56, iss. 7, pp. 94–104 (in Russ.).
- [10] Fedorov S.V., Veldanov V.A. Numerical simulation of cavity formation in soil by a flux of high-speed metallic penetrators. *Zh. Tekh. Fiz.* [Tech. Phys. The Russ. J. Appl. Phys.], 2006, vol. 76, iss. 7, pp. 134–137 (in Russ.).
- [11] Fedorov S.V. By definition the penetration depth of mushy projectiles at hypervelocity interaction. *Zh. Tekh. Fiz.* [Tech. Phys. The Russ. J. Appl. Phys.], 2007, vol. 77, iss. 10, pp. 131–134 (in Russ.).
- [12] Fedorov S.V., Veldanov V.A. Determining of the dimension of a cavity in water behind a fast-moving cylindrical body. *Zh. Tekh. Fiz.* [Tech. Phys. The Russ. J. Appl. Phys.], 2013, vol. 83, iss. 2, pp. 15–20 (in Russ.).
- [13] Magness L.S., Kapoor D. Tungsten composite materials with alternative matrices for ballistic applications. *Proc. of the Fifth Intern. Conf. on Tungsten: “Hard Metals and Refractory Alloys”*. Princeton, New Jersey, 2000, pp. 15–23.
- [14] Povarova K.B., Makarov P.V., Ratner A.D., Zavarzina E.K., Volkov K.V. VNZh-90 type heavy alloys. 1. Effect of alloying and conditions of tungsten powders production of structure and properties of sintered alloys. *Metally* [Russ. Metall. (Engl. Transl.)], 2002, no. 4, pp. 39–48 (in Russ.).

- [15] Zlatin N.A. O roli szhimaemosti v protsesse dinamicheskogo deformirovaniya plastichnykh tel. Nekotorye problemy prochnosti tverdogo tela [On the role of compressibility in the process of dynamic deformation of plastic bodies. In book "Some problems of the strength of solids"]. Moscow–Leningrad, AN SSSR Publ., 1959, pp. 222–229.
- [16] Fedorov S.V., Bayanova Ya.M. Penetration of long strikers under hydrodynamic conditions with allowance for the material compressibility. *Zh. Tekh. Fiz.* [Tech. Phys. The Russ. J. Appl. Phys.], 2011, vol. 56, iss. 9, pp. 45–51 (in Russ.).
- [17] Nigmatulin R.I. Dinamika mnogofaznykh sred [Dynamics of multiphase media. Pt. 1]. Moscow, Nauka Publ., 1987. 464 p.
- [18] Zhernokletov M.V., eds. Metody issledovaniya svoystv materialov pri intensivnykh dinamicheskikh nagruzkakh [Methods for studying the properties of materials under intense dynamic loads]. Sarov, FGUP "RFYaTs-VNIIEF" Publ., 2005. 428 p.
- [19] Kinslow R. (Ed.), High velocity impact phenomena. New York, Academic Press, 1970. 529 p. (Russ. Ed.: Nikolaevskiy V.N. ed. Vysokoskorostnye udarnye yavleniya. Per. s angl. Moscow, Mir Publ., 1973. 538 p.).

Статья поступила в редакцию 01.04.2014

Федоров Сергей Владимирович — старший преподаватель кафедры "Высокоточные летательные аппараты" МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 250 научных работ в области физики взрыва и высокоскоростного удара.

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

Fedorov S.V. — senior teacher of "High Precision Airborne Devices" department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 250 publications in the field of physics of explosion and high velocity impact.

Bauman Moscow State Technical University, 2-ya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation.

Велданов Владислав Антонович — канд. техн. наук, доцент кафедры "Высокоточные летательные аппараты" МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 230 научных работ в области конечной баллистики и механики деформируемого твердого тела.

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

Veldanov V.A. — Cand. Sci. (Eng.), assoc. professor of "High-Precision Flying Vehicles" department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 230 publications in the field of ultimate ballistics and mechanics of deformable solid body. Bauman Moscow State Technical University, 2-ya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation.

Смирнов Виктор Евгеньевич — д-р техн. наук, начальник отделения ФГУП "Научно-исследовательский машиностроительный институт". Автор более 250 научных работ в области баллистики и механики деформируемого твердого тела.

ФГУП "Научно-исследовательский машиностроительный институт", Российская Федерация, 125212, Москва, Ленинградское ш., д. 58.

Smirnov V.E. — Dr. Sci. (Eng.), professor, chief of the Federal State Unitary Enterprise "Mechanical Engineering Research Institute". Author of more than 250 publications in the field of ballistics and mechanics of deformable solid body.

Federal State Unitary Enterprise "Mechanical Engineering Research Institute", Leningradskoe sh. 58, Moscow, Russian Federation.