

Определение параметров проникания пенетраторов в грунтово-скальные преграды по различным эмпирическим зависимостям

© С.В. Федоров, В.А. Велданов, А.В. Дюков, Т.А. Гущина

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

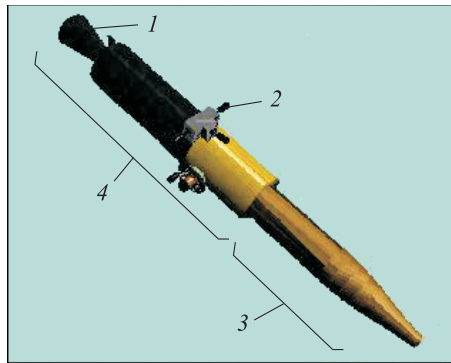
В ближайшей перспективе для исследования поверхностного слоя различных космических тел (планет, астероидов, комет) рассматривается применение высокоскоростных пенетраторов. Глубина проникания пенетраторов при выборе их конструктивных параметров может быть спрогнозирована на основании эмпирических зависимостей, являющихся результатом обработки экспериментальных данных по прониканию недеформируемых ударников в различные геоматериалы. Проведен сравнительный анализ таких зависимостей, полученных и используемых как российскими, так и зарубежными исследователями. Для исследовательского модуля-пенетратора выполнены оценки глубины его проникания в геоматериалы с контрастными прочностными свойствами и испытываемой им при этом перегрузки при начальных скоростях взаимодействия в диапазоне 100...1000 м/с. Получено, что при скорости 1000 м/с глубина проникания исследовательского модуля-пенетратора может составлять от нескольких метров в случае скальной породы средней твердости до нескольких десятков метров в случае рыхлого грунта. В соответствии с некоторыми из проанализированных эмпирических зависимостей зафиксировано проявление масштабного эффекта при проникании, заключающегося в том, что отношение глубин проникания геометрически подобных ударников с неизменным отношением их массы к кубу диаметра превышает коэффициент геометрического подобия.

Ключевые слова: модуль-пенетратор, ударник, грунтово-скальная преграда, глубина проникания, перегрузка, эмпирическая зависимость

Введение. Спускаемые космические аппараты (КА), предназначенные для исследования космических тел Солнечной системы, оснащают специальными грунтозаборными устройствами для определения свойств пород, составляющих поверхностный слой космического тела. Осуществляя бурение поверхностного слоя, такие грунтозаборные устройства достают образцы грунта с разной глубины для их последующего анализа с использованием аппаратуры, размещенной на борту КА. Затем полученная информация передается космическим аппаратом на Землю.

В качестве альтернативного способа исследования поверхностного слоя космических тел рассматривается применение высокоскоростных модулей-пенетраторов (рис. 1), размещаемых на борту КА [1–3]. При пролете КА вблизи исследуемого космического тела модули-пенетраторы отделяются и направляются в заданный район его поверхности. Такие модули-пенетраторы способны проникать в породы поверхностного слоя космического тела на определенную

глубину за счет имеющегося у них запаса кинетической энергии. Они оснащены датчиками и приборами различного назначения, информация с которых передается на Землю либо непосредственно с пенетратора, либо через КА. Глубина проникания пенетраторов может регулироваться за счет выбора их начальной скорости взаимодействия с грунтово-скальной преградой. Применение отделяемых от КА модулей-пенетраторов упрощает исследование поверхностного слоя космических тел, так как не требует посадки КА и позволяет проводить исследования в разных областях поверхности тела. Кроме того, глубина проникания пенетраторов может значительно превышать глубину бурения, обеспечиваемую грунтозаборными устройствами спускаемых КА.



а



б

Рис. 1. Общий вид модуля-пенетратора (а) и его применение для зондирования поверхности космических тел (б):

1 — разгонный двигатель; 2 — система контроля высоты; 3 — пенетратор;
4 — система доставки пенетратора

Конструкция пенетратора должна обладать достаточной прочностью, чтобы исключить возможность его значительного деформирования и разрушения под действием силы сопротивления преграды при

проникании. С увеличением скорости пенетратора сила сопротивления возрастает [4, 5]. Условие обеспечения прочности пенетратора ограничивает его максимально допустимую скорость. Кроме того, ограничения на скорость пенетратора могут накладываться значением максимальной перегрузки [6, 7], которую может выдержать с сохранением работоспособности исследовательская аппаратура, размещенная в пенетраторе. По указанным причинам резервы увеличения глубины проникания исследовательских модулей-пенетраторов в грунтово-скальные преграды за счет повышения их скорости ограничены.

Дополнительное увеличение глубины проникания пенетраторов может быть достигнуто благодаря использованию лидера, движущегося перед пенетратором с существенно более высокой скоростью [8]. Задача лидера — сформировать в грунтово-скальной преграде протяженную каверну с поперечным размером, обеспечивающим последующее беспрепятственное движение по ней пенетратора. Лидер должен проникать в преграду в гидродинамическом режиме с растеканием его материала по стенкам образуемой каверны. Поскольку глубина проникания в гидродинамическом режиме определяется длиной проникающего тела, лидер должен иметь форму удлиненного стержня [9]. Определенные преимущества можно получить при использовании стержней-лидеров из пористого материала [10] и при их сегментировании на отдельные части [11].

Другой способ предварительного создания каверны в грунтово-скальной преграде для движения по ней модуля-пенетратора связан с использованием кумулятивных зарядов, формирующих при взрыве высокоскоростные металлические кумулятивные струи с высокой проникающей способностью [12, 13]. Для увеличения глубины проникания непосредственно модуля-пенетратора (после преодоления им каверны в преграде, сформированной лидером) ему можно придать дополнительный импульс реактивной тяги в процессе проникания [8, 14, 15].

При выборе конструктивных характеристик пенетраторов (диаметра, массы, формы головной части) и их скорости необходима информация о влиянии этих параметров на глубину проникания в различные грунтово-скальные преграды. Поскольку пенетратор при проникании должен вести себя как недеформируемое твердое тело, для получения такой информации можно воспользоваться результатами теоретических [16–19] и экспериментальных [20, 21] исследований проникания недеформируемых ударников в различные геоматериалы. Для предварительных оценок глубины проникания можно использовать эмпирические зависимости, полученные на основании обработки экспериментальных данных по прониканию недеформируемых ударников в геоматериалы [22–25].

Цель настоящей работы — проанализировать такие зависимости с последующим проведением на их основе оценочных расчетов параметров проникания (глубины проникания и испытываемой в процессе проникания перегрузки) применительно к пенетратору с возможными конструктивными характеристиками при его взаимодействии с грунтово-скальными преградами, имеющими контрастные прочностные свойства.

Анализ эмпирических зависимостей. Надежность прогноза глубины проникания пенетраторов повышается, если он выполняется на основании не одной, а нескольких зависимостей, полученных различными исследователями. В связи с этим наряду с используемыми российскими специалистами Березанской формулой и формулой Забудского — Майевского [22, 23] были проанализированы также зависимости, установленные и используемые зарубежными исследователями.

Согласно модифицированной Березанской формуле (формуле АНИИ), глубина проникания h ударника массой m и диаметром d мишеля в грунтово-скальную преграду по нормали к ее поверхности определяется как

$$h = \lambda \left(2,8\sqrt[3]{d} - 1,3\sqrt{d} \right) k_B \frac{m}{d^2} v_0, \quad (1)$$

где $\lambda = 0,5 + 0,4\sqrt[3]{(l_h/d)^2}$ — коэффициент, учитывающий высоту оживальной головной части ударника (l_h — высота головной части); k_B — коэффициент, характеризующий свойства преграды; v_0 — начальная скорость ударника.

Формула Забудского — Майевского для случая проникания по нормали имеет вид

$$h = \frac{2m}{a_{ZM} b_{ZM} \pi d^2} \ln \left(1 + b_{ZM} v_0^2 \right), \quad (2)$$

где a_{ZM} , b_{ZM} — коэффициенты, зависящие от свойств преграды.

Формула (2) получена для ударников с оживальной головной частью, высота которой примерно равна диаметру ударника.

Среди эмпирических зависимостей, установленных зарубежными исследователями, центральное место занимает формула Янга [23, 24], представляемая при $v_0 > 61$ м/с соотношением

$$h = 2,13 \cdot 10^{-5} \frac{\lambda k_S k_m}{d^{1,4}} (v_0 - 30,5), \quad (3)$$

где λ , k_S , k_m — коэффициенты, учитывающие форму головной части ударника, свойства грунтово-скальной преграды и массу ударника соответственно.

При оживальной форме головной части $\lambda = 0,18l_h/d + 0,56$, при конической $\lambda = 0,25l_h/d + 0,56$. Для грунтовых преград коэффициент k_S изменяется от нескольких единиц до нескольких десятков.

Для скальных преград значение k_S вычисляется по формуле $k_S = 2,7/(10^{-6} f_c k_Q)^{0,3}$, где f_c — прочность материала преграды на сжатие; k_Q — параметр, характеризующий качество скальной преграды и изменяющийся в диапазоне $0,1 \dots 0,9$. В случае проникания в грунтовые преграды $k_m = 0,27m^{1,1}$ при $m < 27$ кг и $k_m = m^{0,7}$ при $m \geq 27$ кг, в случае проникания в скальные преграды $k_m = 0,46m^{0,85}$ при $m < 182$ кг и $k_m = m^{0,7}$ при $m \geq 182$ кг.

Кроме того, при оценках глубины проникания использовались соотношения, полученные Кэром для грунтовых преград [23, 25]:

$$h = \begin{cases} 2d\sqrt{\gamma}(0,001v_0)^{0,625} & \text{при } v_0 \leq 1000/\gamma^{0,8}; \\ (\gamma(0,001v_0)^{1,25} + 1) d & \text{при } v_0 > 1000/\gamma^{0,8}, \end{cases} \quad (4)$$

где γ — параметр, который зависит от коэффициента $\lambda = \min[0,72 + 10^{-3}(0,25 + (l_h/d)^2)^{2,72}; 1,45]$, учитывающего высоту оживальной головной части ударника, от массы, диаметра миделя ударника и прочности f_c грунта на сжатие,

$$\gamma = 20,5 \frac{\lambda m}{d^{2,31} \sqrt{f_c}}.$$

Следует отметить, что в рамках рассматриваемой задачи прогнозирования глубины проникания в геоматериалы исследовательских модулей-пенетраторов, скорость которых для обеспечения достаточного заглубления должна быть на уровне сотен метров в секунду, практической значимостью обладает второе из соотношений Кэра (4) (соответствующее случаю $v_0 > 1000/\gamma^{0,8}$), так как при характерных параметрах пенетраторов (диаметр миделя $d \approx 100$ мм, масса $m \approx 10$ кг) и прочности на сжатие грунтовых преград ($f_c < 1$ МПа) значение комплекса $1000/\gamma^{0,8}$ существенно меньше ста.

Для оценок глубины проникания в скальные преграды применялась также эмпирическая зависимость Бернарда — Крейтона [23]

$$h = \frac{4m}{\pi d^2} \left[\frac{v_0}{k_1} + \frac{k_0}{k_1^2} \ln \left(1 + \frac{k_1}{k_0} v_0 \right) \right], \quad (5)$$

где $k_0 = 4f_c k_Q^{0,2} / \lambda$, $k_1 = 3\sqrt{f_c \rho_{imp}} k_Q^{0,1} / \lambda$ (ρ_{imp} — плотность материала ударника), а $\lambda = 0,863 \sqrt{\frac{l_h}{d} + \frac{0,25}{l_h/d}}$ при оживальной форме головной части и $\lambda = 0,805 \sqrt[4]{4(l_h/d)^2 + 1}$ при конической.

Соотношения (1)–(5) записаны таким образом, что все упомянутые в них величины должны быть в единицах СИ. Преимуществом формул Кэра (4) и Бернарда — Крейтона (5), а также формулы Янга (3) для скальных преград является использование в них при определении зависимости глубины проникания от свойств материала преграды единой объективной характеристики геоматериала — прочности f_c геоматериала на сжатие. В модифицированной Березанской формуле (1) и формуле Забудского — Майевского (2) коэффициенты, учитывающие свойства преграды, индивидуальны для каждой из формул и не связаны с какой-либо характеристикой геоматериала, устанавливаемой единым образом.

Заслуживает внимания тот факт, что в соответствии с соотношениями (1), (2), (5) и вторым из соотношений (4), реализующимся на практике в рамках решаемой проблемы, глубина проникания ударников оказывается прямо пропорциональной их массе. В то же время из формулы Янга (3) вытекает степенная зависимость глубины проникания от массы ударника с изменением показателя степени в диапазоне 0,7...1,1 для ударников с разной массой и различных типов грунтово-скальных преград.

В формулах Янга (3) и Бернарда — Крейтона (5) влияние формы головной части ударника на глубину проникания учитывается с большей степенью детализации. Соответствующие коэффициенты в этих формулах зависят от высоты l_h и определены для головных частей оживальной и конической формы. Модифицированная Березанская формула (1) и формула Кэра (4) позволяют учесть высоту головной части оживальной формы, а формула Забудского — Майевского (2) справедлива только в случае проникания ударников, имеющих оживальную головную часть с небольшим удлинением (в пределах диаметра ударника).

На рис. 2, а проиллюстрировано изменение коэффициента формы головной части ударника в зависимости от ее относительной высоты l_h/d , изменяющейся в диапазоне, соответствующем головным частям реальных ударников, согласно различным эмпирическим соотношениям. Видно, что с увеличением удлинения головной части коэффициент ее формы возрастает, изменяясь при фиксированных значениях l_h/d в довольно широких пределах согласно разным зависимостям. Однако

сравнение абсолютных значений этого коэффициента в различных зависимостях с точки зрения его влияния на глубину проникания мало информативно, так как наблюдаемое различие может компенсироваться разностью значений параметров, зависящих от свойств грунтово-скальной преграды и по-разному определяемых в различных зависимостях.

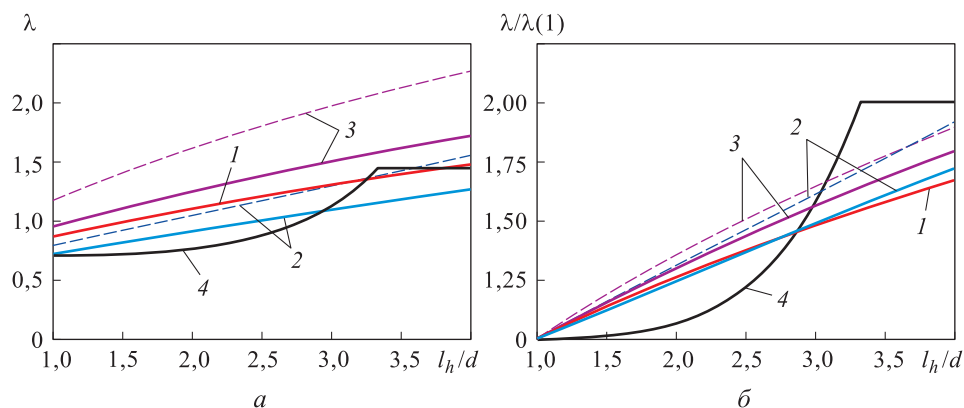


Рис. 2. Зависимости λ (а) и $\lambda/\lambda(1)$ (б) от относительной высоты оживальной (сплошные линии) и конической (штриховые линии) головной части ударника:

1 — модифицированная Березанская формула; 2 — формула Янга;
3 — формула Бернарда — Крейтона; 4 — формула Кэра

Обоснованным является лишь сравнение коэффициентов формы для конической и оживальной головных частей по данным одной и той же эмпирической зависимости. Согласно рис. 2, а, при одном и том же удлинении коэффициент формы для конической головной части больше, чем для оживальной, как в соответствии с формулой Янга (3), так и в соответствии с формулой Бернарда — Крейтона (5) (см. сплошные и штриховые линии 2 и 3). При этом формула Бернарда — Крейтона устанавливает более значительное преимущество конической головной части над оживальной по коэффициенту формы, чем формула Янга. Так, при $l_h/d = 2,5$ коэффициент формы конической головной части больше коэффициента формы оживальной части, в 1,31 раза согласно формуле Бернарда — Крейтона и только в 1,17 раза согласно формуле Янга.

Если коэффициент λ в различных зависимостях соотнести с его значением $\lambda(1)$ при $l_h/d = 1$, то сравнительный анализ получаемых при этом относительных значений коэффициента формы головной части становится уже корректным, и из рис. 2, б видно, что возрастание глубины проникания с увеличением удлинения головной части происходит примерно одинаково по разным зависимостям, если не принимать во внимание формулу Кэра (4), дающую заметно отлича-

ющийся результат. Обращает на себя внимание практически полное совпадение значений $\lambda/\lambda(1)$ для оживальных головных частей согласно модифицированной Березанской формуле и формуле Янга (см. рис. 2, б, сплошные линии 1 и 2), а также очень близкое соответствие этих значений для конических головных частей согласно формулам Янга и Бернарда — Крейтона (см. штриховые линии 2 и 3).

На основании рис. 2, б можно сделать также вывод о том, что для ударников с конической головной частью увеличение глубины их проникания с увеличением относительной высоты головной части l_h/d происходит быстрее, чем для ударников с оживальной головной частью, если не брать в расчет формулу Кэра (4). Последняя свидетельствует о несколько необычном изменении прироста глубины проникания ударников с увеличением удлинения l_h/d оживальной головной части: при удлинениях, меньших примерно трех, этот прирост ниже, чем для конических головных частей, а при дальнейшем увеличении удлинения он резко возрастает, превышая прирост, соответствующий конической форме.

Для зависимостей Забудского — Майевского (2) и Бернарда — Крейтона (5) выполняется принцип геометрического подобия. Для геометрически подобных ударников (при неизменном отношении массы ударника к кубу его диаметра) отношение их глубин проникания h/h_0 равно коэффициенту геометрического подобия d/d_0 . Остальные рассмотренные зависимости свидетельствуют о нарушении в той или иной степени принципа геометрического подобия при проникании ударников.

Проявление масштабного эффекта при проникании проиллюстрировано на рис. 3, на котором сравнивается относительная глубина проникания геометрически подобных ударников с постоянным отношением массы к кубу их диаметра (в качестве базового при проведении сравнения был выбран ударник диаметром $d_0 = 75$ мм и массой $m_0 = 6$ кг). Видно, что, согласно модифицированной Березанской формуле (1) и формулам Янга (3) и Кэра (4), с увеличением диаметра ударников d при сохранении их геометрического подобия отношение h/h_0 глубины их проникания к глубине проникания базового ударника возрастает быстрее, чем коэффициент геометрического подобия d/d_0 (см. линии 1–4). При этом формуле Кэра соответствует заметно более значительное проявление масштабного эффекта по сравнению с модифицированной Березанской формулой и формулами Янга для грунтовой и скальной преград. Кроме того, в отличие от последних масштабный эффект, предсказываемый формулой Кэра, в некоторой степени зависит от начальной скорости v_0 ударника.

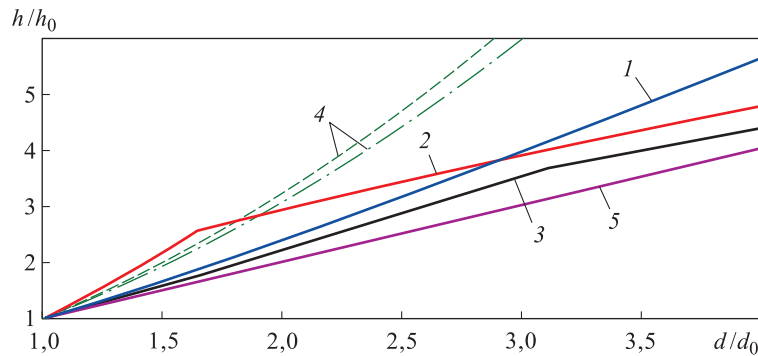


Рис. 3. Зависимость относительной глубины проникания от коэффициента геометрического подобия ударников по различным эмпирическим соотношениям: 1 — модифицированная Березанская формула; 2, 3 — формулы Янга для грунтовой и скальной преграды соответственно; 4 — формула Кэра при $v_0 = 1000$ м/с (—) и $v_0 = 100$ м/с (---); 5 — формулы Забудского — Майевского и Бернарда — Крейтона

Физической причиной проявления масштабного эффекта при проникании может быть влияние вязких свойств материала преграды. Характерно, что согласно формуле Янга (3) масштабный эффект при проникании в грунтовые преграды проявляется в большей степени, чем при проникании в скальные преграды (см. рис. 3, линии 2, 3). Это вполне объяснимо, если принять во внимание, что сила сопротивления грунтово-скальной преграды прониканию ударника должна зависеть от вязких и прочностных свойств ее материала. Для скальных преград прочность существенно выше, чем для грунтовых, в связи с чем проявление вязких свойств в плане их влияния на полную силу сопротивления при проникании в скальные преграды оказывается менее выраженным.

Определение перегрузки ударника. На основании рассматриваемых эмпирических зависимостей (1)–(5) для глубины проникания недеформируемых ударников в геоматериалы может быть определена перегрузка, испытываемая ударником при проникании. Под перегрузкой понимается отношение модуля его ускорения a при торможении в преграде к ускорению свободного падения g :

$$n = |a|/g.$$

Контроль данных по перегрузке необходим для того, чтобы исключить превышение ею максимально допустимого значения, определяемого условиями сохранения работоспособности датчиков и приборов, которыми оснащается исследовательский модуль-пенетратор.

Ускорение ударника в процессе проникания может быть определено, если известна зависимость его текущей скорости v при торможении в преграде от текущей глубины проникания h_v :

$$a = \frac{dv}{dt} = \frac{dv}{dh_v} \frac{dh_v}{dt} = \frac{dv}{dh_v} v, \quad (6)$$

где $v = dh_v/dt$ (t — время).

Взаимосвязь текущих значений h_v и v устанавливается очевидным соотношением

$$h_v = h(v_0) - h(v); \quad (7)$$

при этом предполагается, что ударник с начальной скоростью v_0 , проникнув в преграду на глубину h_v и имея скорость v , далее проникает еще на глубину $h(v)$. Последнюю можно рассчитать по тем же зависимостям (1)–(5), что и полную глубину проникания $h(v_0)$, если заменить в них значение v_0 на текущее значение v .

Рассматривая соотношение (7) как неявную функцию для определения текущей скорости v в процессе проникания, с учетом выражения (6) получаем соотношение

$$a = -\frac{v}{dh/dv},$$

согласно которому для вычисления ускорения ударника на основании эмпирических зависимостей (1)–(5) необходимо последние продифференцировать по переменной v , предварительно заменив ею начальную скорость v_0 . В результате приходим к следующим законам изменения ускорения ударника в процессе проникания в зависимости от его текущей скорости v :

- для модифицированной Березанской формулы (1)

$$a = -\frac{d^2v}{\lambda(2,8\sqrt[3]{d} - 1,3\sqrt{d})k_B m}; \quad (8)$$

- для формулы Забудского — Майевского (2)

$$a = -\frac{\pi d^2 a_{ZM}(1 + b_{ZM}v^2)}{4m}; \quad (9)$$

- для формулы Янга (3)

$$a = -4,69 \cdot 10^4 \frac{d^{1,4}v}{\lambda k_S k_m}; \quad (10)$$

- для формулы Кэра (4)

$$a = \begin{cases} -8 \cdot 10^5 \frac{(0,001v)^{1,375}}{d\sqrt{\gamma}} & \text{при } v \leq 1000/\gamma^{0,8}; \\ -8 \cdot 10^5 \frac{(0,001v)^{0,75}}{d\gamma} & \text{при } v > 1000/\gamma^{0,8}; \end{cases} \quad (11)$$

- для формулы Бернарда — Крейтона (5)

$$a = - \frac{\pi d^2 k_1 v \left(1 + \frac{k_1}{k_0} v \right)}{4m \left(2 + \frac{k_1}{k_0} v \right)}. \quad (12)$$

Если дополнительно умножить соотношения (8)–(12) на массу ударника m , то получим силу F_t сопротивления преграды, действующую на ударник при проникании. Следует отметить, что получаемый при этом результат для силы сопротивления на основании соотношений (8), (9), (12) и второго из соотношений (11) (соответствующего случаю $v > 1000/\gamma^{0,8}$, реализующемуся, как отмечалось выше, при рассматриваемых условиях проникания) не зависит от массы ударника и при заданных его диаметре и форме головной части определяется лишь скоростью ударника и свойствами материала преграды.

Соотношение (10), вытекающее из формулы Янга (3), приводит к выражению для силы сопротивления, зависящей дополнительно от массы ударника. Для грунтовых преград получается, что значение F_t пропорционально $m^{-0,1}$ при $m < 27$ кг и $m^{0,3}$ при $m \geq 27$ кг, для скальных преград $F_t \sim m^{0,15}$ при $m < 182$ кг и $F_t \sim m^{0,3}$ при $m \geq 182$ кг. Тот факт, что масса ударника входит в выражение для силы сопротивления, полученное на основании формулы (10), может означать, что F_t зависит не только от скорости ударника, но и от его ускорения. В частности, пропорциональность F_t значению массы m с положительным показателем степени (для грунтовых преград при $m \geq 27$ кг и для скальных преград) может свидетельствовать о том, что сила сопротивления уменьшается с увеличением абсолютного значения ускорения (т. е. при уменьшении массы ударника) и возрастает в противоположном случае.

Определив отношение абсолютных значений ускорения (8)–(12) к ускорению свободного падения g , найдем перегрузку ударника

в процессе проникания. Основным интерес представляет ее максимальное значение n_{\max} , которое достигается в момент начала проникания (когда скорость ударника максимальна и равна начальному значению v_0).

Результаты оценочных расчетов. С использованием проанализированных эмпирических зависимостей была проведена оценка глубины проникания в геоматериалы с контрастными прочностными свойствами (типа рыхлого грунта и скальной породы средней твердости) применительно к исследовательскому модулю-пенетратору диаметром $d = 150$ мм и массой $m = 50$ кг с оживальной головной частью высотой $l_h = 1,5d$ в диапазоне начальных скоростей взаимодействия $100 \dots 1000$ м/с (рис. 4). Значения параметров, характеризующих свойства геоматериалов в различных эмпирических зависимостях, были приняты на основании данных работ [22, 23]: для рыхлого грунта $k_B = 14 \cdot 10^{-6}$; $a_{ZM} = 4,5 \cdot 10^6$; $b_{ZM} = 60 \cdot 10^{-6}$; $k_S = 9$; $f_c = 60$ кПа; для скальной породы средней твердости $k_B = 2,5 \cdot 10^{-6}$; $a_{ZM} = 50 \cdot 10^6$; $b_{ZM} = 15 \cdot 10^{-6}$; $f_c = 10$ МПа; $k_Q = 0,5$.

Как видно на рис. 4, а, при проникании в рыхлый грунт в диапазоне начальных скоростей модуля-пенетратора $100 \dots 500$ м/с расчеты по всем использовавшимся зависимостям дают очень близкие результаты, и при $v_0 = 500$ м/с глубина проникания составляет примерно 15 м. При более высоких скоростях хорошая согласованность в результатах сохраняется для модифицированной Березанской формулы и формул Янга и Кэра (линии 1, 3, 4 соответственно). Однако расчеты по формуле Забудского — Майевского (2) при $v_0 > 500$ м/с дают в сравнении с ними заметно меньшую глубину проникания. При скорости модуля-пенетратора 1000 м/с она составляет чуть более 20 м, в то время как остальные эмпирические зависимости прогнозируют для данной скорости примерно в 1,5 раза большую глубину проникания. Именно этот прогноз представляется более достоверным с учетом того, что в работе [23] для формулы Янга указывается верхняя граница диапазона скоростей, в котором она может применяться, — 1200 м/с. При этом, по данным работы [22], на результаты, предсказываемые формулой Забудского — Майевского, можно полагаться только при скоростях взаимодействия в пределах 400 м/с.

Для случая проникания в скальную породу средней твердости в рассмотренном диапазоне скоростей модуля-пенетратора все использовавшиеся эмпирические зависимости дают близкий прогноз глубины проникания, которая линейно возрастает примерно от $0,5$ м при $v_0 = 100$ м/с до 5 м при $v_0 = 1000$ м/с (рис. 4, б).

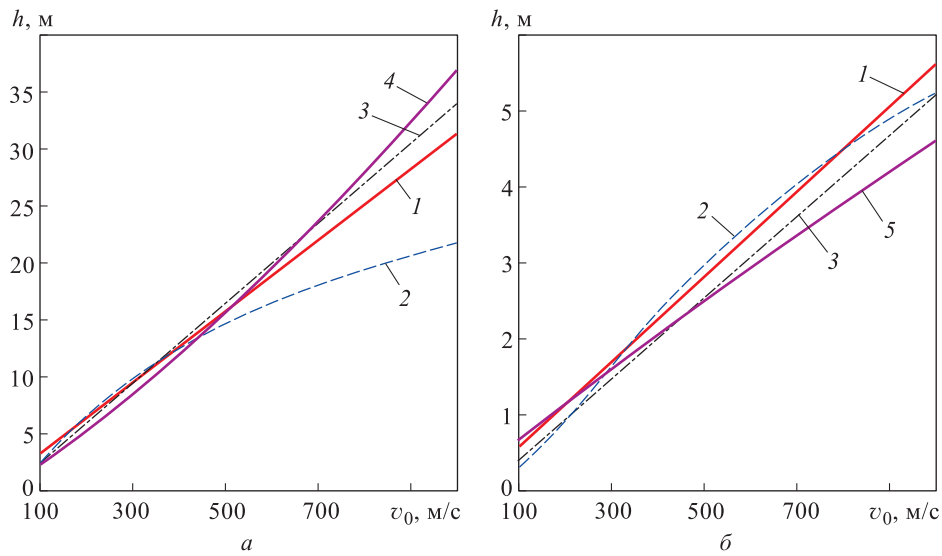


Рис. 4. Зависимость глубины проникания в рыхлый грунт (а) и скальную породу средней твердости (б) от скорости модуля-пенетратора согласно различным эмпирическим соотношениям:

1 — модифицированная Березанская формула; 2 — формула Забудского — Майевского; 3 — формула Янга; 4 — формула Кэра; 5 — формула Бернарда — Крейтона

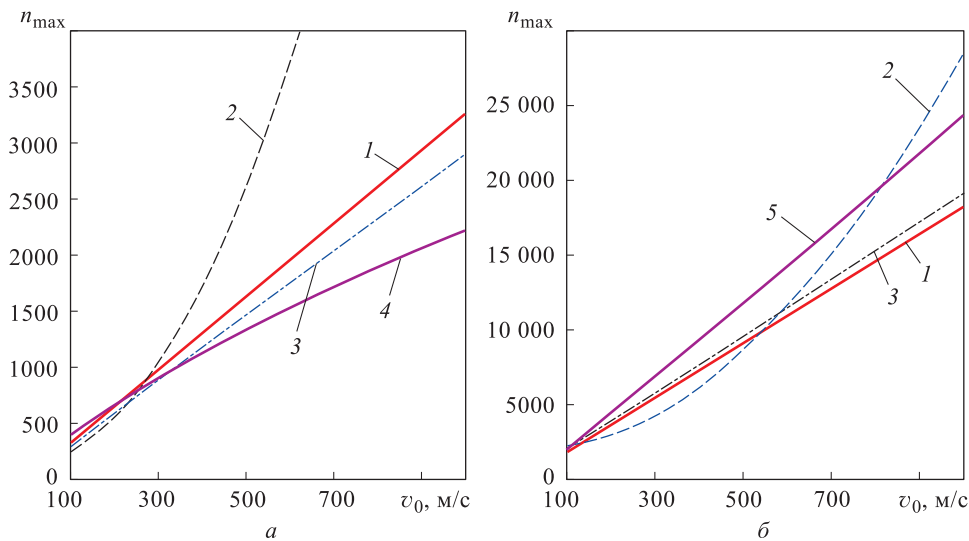


Рис. 5. Зависимость максимальной перегрузки от скорости модуля-пенетратора при проникании в рыхлый грунт (а) и скальную породу средней твердости (б) согласно различным эмпирическим соотношениям:

1 — модифицированная Березанская формула; 2 — формула Забудского — Майевского; 3 — формула Янга; 4 — формула Кэра; 5 — формула Бернарда — Крейтона

Расчеты максимальной перегрузки пенетратора, выполненные на основании формул (8)–(12), дали следующие результаты (как уже отмечалось, перегрузка максимальна в момент начала проникания,

когда скорость пенетратора равна начальному значению v_0). При проникании в рыхлый грунт значение n_{\max} возрастает примерно от 400 при скорости пенетратора 100 м/с до 2000...3000 при скорости 1000 м/с (рис. 5, а). Изменение начальной скорости пенетратора в том же диапазоне при проникании в скальную породу средней твердости приводит к значениям максимальной перегрузки, изменяющимся примерно от 2000 при $v_0 = 100$ м/с до 20 000...25 000 при $v_0 = 1000$ м/с (рис. 5, б).

При этом так же, как и для глубины проникания, почти все рассмотренные эмпирические зависимости дают достаточно хорошо согласующиеся результаты по перегрузке пенетратора с единственным исключением, касающимся определения перегрузки в соответствии с соотношением (9), следующим из формулы Забудского — Майевского (2). При проникании в рыхлый грунт согласованность соотношения (9) с зависимостями (8), (10)–(12) для ускорения пенетратора наблюдается только в диапазоне скоростей, меньших 300 м/с (см. рис. 5, а). При скоростях, больших этого значения, вычисление перегрузки на основании соотношения (9), соответствующего формуле Забудского — Майевского, дает существенно завышенный результат. При проникании в скальную породу средней твердости согласованность результатов по перегрузке, предсказываемых соотношением (9) и другими зависимостями для определения ускорения пенетратора, заметно лучше. Для преграды этого типа некоторое завышение перегрузки по зависимости (9), вытекающей из формулы Забудского — Майевского (2), наблюдается лишь при скоростях пенетратора выше 700 м/с (см. рис. 5, б).

Заключение. Проведенные сравнительные расчеты глубины проникания пенетраторов в различные геоматериалы и испытываемой ими перегрузки по эмпирическим зависимостям, полученным и используемым российскими и зарубежными специалистами, подтверждают перспективность применения высокоскоростных пенетраторов для исследований поверхностного слоя космических тел. Близость результатов по глубине проникания в зависимости от скорости, предсказываемых различными эмпирическими соотношениями со своими отличительными особенностями, дает основание полагать эти результаты достаточно надежными и пригодными в качестве предварительных оценок на этапе выбора конструктивных параметров пенетраторов. При скорости $v_0 \approx 1000$ м/с глубина проникания пенетратора диаметром 150 мм и массой 50 кг может составлять несколько метров для преграды типа скальной породы средней твердости и несколько десятков метров для преграды типа рыхлого грунта.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Велданов В.А., Смирнов В.Е., Хаврошкин О.Б. Лунный пенетратор: снижение перегрузок, управление прониканием. *Астрономический вестник*, 1999, т. 33, № 5, с. 490–494.
- [2] Сурков Ю.А. На пути к освоению Луны. *Земля и Вселенная*, 2003, № 4, с. 18–28.
- [3] Галеев А.Г., Гусев Е.В., Родченко В.В., Садретдинова Э.Р. Выбор параметров пенетратора, входящего в лунный грунт с нулевой скоростью. *Электронный журнал «Труды МАИ»*, 2013, № 64, с. 1–23.
<http://trudymai.ru/published.php?ID=36455>
- [4] Каминский М.В., Копытов Г.Ф., Киселев Ю.Г., Кочнев Ю.В., Могилев В.А., Фатеев Ю.А. Критическая скорость при внедрении ударников с конической носовой формой в грунтовые преграды. *Сб. материалов III Науч. конф. Волжского регионального центра РАН «Современные методы проектирования и отработки ракетно-артиллерийского вооружения»*. Т. 2. Саров, РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2004, с. 642–647.
- [5] Велданов В.А., Марков В.А., Пусев В.И., Ручко А.М., Сотский М.Ю., Сотский Ю.М., Федоров С.В. Исследование динамических механических свойств алюминиевых сплавов методом акселерометрии. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2010, № 2, с. 37–46.
- [6] Forrestal M.J., Frew D.J., Hickerson J.P., Rohwer T.A. Penetration of Concrete Targets with Deceleration-Time Measurements. *International Journal of Impact Engineering*, 2003, vol. 28, pp. 479–497.
- [7] Sotskiy M.Yu., Veldanov V.A., Selivanov V.V. Non-Stationary Process of Acceleration of the Measuring Probe in the Laboratory Ballistic Module. *Acta Astronautica*, 2019, vol. 163, pp. 79–83.
- [8] Fedorov S.V., Veldanov V.A., Sotskiy M.Yu., Fedorova N.A. Jet Thrust Penetrators for Sounding the Surface Layer of Space Bodies. *Acta Astronautica*, 2021, vol. 180, pp. 189–195.
- [9] Tate A. A Theory for the Deceleration of Long Rods after Impact. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 1967, vol. 15, no. 6, pp. 387–399.
- [10] Федоров С.В., Бабкин А.В., Велданов В.А., Гладков Н.А., Ладов С.В. О высокоскоростном проникании стержней из пористого материала. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки*, 2016, № 5, с. 18–32.
- [11] Федоров С.В., Велданов В.А. Применение сегментированных ударников для формирования каверны в грунтово-скальных преградах. *Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук*, 2012, № 1 (71), с. 43–50.
- [12] Walters W.P., Zukas J.A. *Fundamentals of Shaped Charges*. New York, Wiley, 1989, 398 p.
- [13] Федоров С.В., Бабкин А.В., Ладов С.В. Особенности инерционного удлинения высокоградиентного проводящего стержня в продольном низкочастотном магнитном поле. *Инженерно-физический журнал*, 2001, т. 74, № 2, с. 79–86.
- [14] Ben-Dor G., Dubinsky A., Elperin T. Optimization of penetration into geological and concrete shields by impactor with jet thruster. *Journal of Mechanics of Materials and Structures*, 2008, vol. 3, no. 4, pp. 707–727.
- [15] Федоров С.В., Федорова Н.А., Велданов В.А. Использование импульса реактивной тяги для увеличения глубины проникания исследовательских модулей в малопрочные грунтовые преграды. *Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук*, 2014, № 4 (84), с. 53–63.

- [16] Сагомоян А.Я. *Проникание*. Москва, Изд-во Моск. ун-та, 1974, 300 с.
- [17] Ben-Dor G., Dubinsky A., Elperin T. *Applied High-Speed Plate Penetration Dynamics*. Springer, Netherlands, 2006, 357 p.
- [18] Li Q.M., Chen X.W. Dimensionless Formulae for Penetration Depth of Concrete Target Impacted by a Non-Deformable Projectile. *International Journal of Impact Engineering*, 2003, vol. 28, no. 1, pp. 93–116.
- [19] Баженов В.Г., Брагов А.М., Котов В.Л., Кочетков А.В. Исследование удара и проникания тел вращения в мягкий грунт. *Прикладная математика и механика*, 2003, т. 67, № 4, с. 686–697.
- [20] Savvateev A.F., Budin A.V., Kolikov V.A., Rutberg Ph.G. High-Speed Penetration into Sand. *International Journal of Impact Engineering*, 2001, vol. 26, pp. 675–681.
- [21] Jinzhu L., Zhongjie L., Hongsong Zh., Fenglei H. Perforation Experiments of Concrete Targets with Residual Velocity Measurements. *International Journal of Impact Engineering*, 2013, vol. 57, pp. 1–6.
- [22] Балаганский И.А., Мержиевский Л.А. *Действие средств поражения и боеприпасов*. Новосибирск, Изд-во НГТУ, 2012, 408 с.
- [23] Ben-Dor G., Dubinsky A., Elperin T. Engineering models of high speed penetration into geological shields. *Central European Journal of Engineering*, 2014, vol. 4, no. 1, pp. 1–19.
- [24] Ben-Dor G., Dubinsky A., Elperin T. Engineering approach to penetration modeling. *Engineering Fracture Mechanics*, 2008, vol. 75, no. 14, pp. 4279–4282.
- [25] Kar A.K. Residual velocity for projectiles. *Nuclear Engineering and Design*, 1979, vol. 53, no. 1, pp. 87–95.

Статья поступила в редакцию 03.03.2022

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Федоров С.В., Велданов В.А., Дюков А.В., Гущина Т.А. Определение параметров проникания пенетраторов в грунтово-скальные преграды по различным эмпирическим зависимостям. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2022, вып. 4. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2022-4-2167>

Федоров Сергей Владимирович — старший преподаватель кафедры «Высокоточные летательные аппараты» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 300 научных работ в области физики взрыва и высокоскоростного удара.
e-mail: fedorovsv@bmstu.ru

Велданов Владислав Антонович — чл.-корр. РАЕН, канд. техн. наук, доцент кафедры «Высокоточные летательные аппараты» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 200 научных работ в области высокоскоростного удара и конечной баллистики. e-mail: veldanov@bmstu.ru

Дюков Алексей Валерьевич — студент 2-го курса кафедры «Высокоточные летательные аппараты» МГТУ им. Н.Э. Баумана. e-mail: alexdyukov.job@yandex.ru

Гущина Татьяна Александровна — студентка 2-го курса кафедры «Высокоточные летательные аппараты» МГТУ им. Н.Э. Баумана.
e-mail: tania12376@mail.ru

Various empirical dependencies in determining the parameters of penetrators permeating into soil-rock barriers

© S.V. Fedorov, V.A. Veldanov, A.V. Dyukov, T.A. Guschina

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

The paper focuses on the use of high-speed penetrators in future study of the surface layer of various cosmic bodies, e.g. planets, asteroids, comets. In choosing the design parameters of penetrators, the penetration depth can be predicted according to empirical dependencies, which result from processing experimental data on the penetration of non-deformable impactors into various geomaterials. Such dependences obtained and used by both Russian and foreign researchers were comparatively analyzed. For a research module-penetrator with a diameter of 150 mm and a mass of 50 kg, we estimated the depth of its penetration into geomaterials with contrasting strength properties and its overload at initial interaction velocities of 100–1000 m/s. Findings of the research show that for the selected parameters of the penetrator and its speed of 1000 m/s, the penetration depth can range from several meters in the case of medium-hard rock to several tens of meters in the case of loose soil. Relying on some empirical dependences analyzed, we recorded the scale effect during penetration, which implies that the ratio of the penetration depths of geometrically similar impactors with a constant mass-diameter cube relation exceeds the coefficient of geometric similarity.

Keywords: module-penetrator, impactor, soil-rock barrier, penetration depth, overload, empirical dependence

REFERENCES

- [1] Veldanov V.A., Smirnov V.E., Khavroshkin O.B. *Astronomicheskiy vestnik. Issledovaniya solnechnoy sistemy — Solar System Research*, 1999, vol. 33, no. 5, pp. 432–436.
- [2] Surkov Yu.A. *Zemlya i Vselennaya (Earth and Universe)*, 2003, no. 4, pp. 18–28.
- [3] Galeev A.G., Gusev E.V., Rodchenko V.V., Sadretdinova E.R. *Trudy MAI (Proceedings of MAI)*, 2013, no. 64. Available at: <http://trudymai.ru/published.php?ID=36455>
- [4] Kaminsky M.V., Kopytov G.F., Kiselev Yu.G., Kochnev Yu.V., Mogilev V.A., Fateev Yu.A. Kriticheskaya skorost pri vnedrenii udarnikov s konicheskoy nosovoy formoy v gruntovye pregrady [Critical velocity at penetration of conic nosed impactors into soil targets]. *Sbornik materialov III nauchnoy konferentsii Volzhskogo regionalnogo tsentra RARAN «Sovremennye metody proektirovaniya i obrabotki raketno-artilleriyskogo voozuzheniya»* [Proceedings of the 3rd Scientific conf. of the RAMAS Volga regional center “Advanced methods of design and development of missile and artillery weapons]. In 2 vols, vol. 2. Sarov, VNIIEF Rosatom Publ., 2004, pp. 642–647.
- [5] Veldanov V.A., Markov V.A., Pusev V.I., Ruchko A.M., Sotskiy M.Yu., Sotskiy Yu.M., Fedorov S.V. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Seriya: Mashinostroenie — Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Mechanical Engineering*, 2010, no. 2, pp. 37–46.
- [6] Forrestal M.J., Frew D.J., Hickerson J.P., Rohwer T.A. Penetration of Concrete Targets with Deceleration-Time Measurements. *International Journal of Impact Engineering*, 2003, vol. 28, pp. 479–497.

- [7] Sotskiy M.Yu., Veldanov V.A., Selivanov V.V. Non-Stationary Process of Acceleration of the Measuring Probe in the Laboratory Ballistic Module. *Acta Astronautica*, 2019, vol. 163, pp. 79–83.
- [8] Fedorov S.V., Veldanov V.A., Sotskiy M.Yu., Fedorova N.A. Jet Thrust Penetrators for Sounding the Surface Layer of Space Bodies. *Acta Astronautica*, 2021, vol. 180, pp. 189–195.
- [9] Tate A. A Theory for the Deceleration of Long Rods after Impact. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 1967, vol. 15, no. 6, pp. 387–399.
- [10] Fedorov S.V., Babkin A.V., Veldanov V.A., Gladkov N.A., Ladov S.V. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Seriya Estestvennyye nauki — Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Natural Sciences*, 2016, no. 5, pp. 18–32.
- [11] Fedorov S.V., Veldanov V.A. *Izvestiya Rossiyskoy akademii raketnykh i artilleriyskikh nauk (Bulletin of the Russian Academy of Missile and Artillery Sciences)*, 2012, no. 1 (71), pp. 43–50.
- [12] Walters W.P., Zukas J.A. *Fundamentals of Shaped Charges*. Wiley, New York, 1989, 398 p.
- [13] Fedorov S.V., Babkin A.V., Ladov S.V. *Inzhenerno-fizicheskiy zhurnal — Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2001, vol. 74, no. 2, pp. 364–374.
- [14] Ben-Dor G., Dubinsky A., Elperin T. Optimization of penetration into geological and concrete shields by impactor with jet thruster. *Journal of Mechanics of Materials and Structures*, 2008, vol. 3, no. 4, pp. 707–727.
- [15] Fedorov S.V., Fedorova N.A., Veldanov V.A. *Izvestiya Rossiyskoy akademii raketnykh i artilleriyskikh nauk (Bulletin of the Russian Academy of Missile and Artillery Sciences)*, 2014, no. 4 (84), pp. 53–63.
- [16] Sagomonyan A.Ya. *Pronikanie [Penetration]*. Moscow, MSU Publ., 1974, 300 p.
- [17] Ben-Dor G., Dubinsky A., Elperin T. *Applied High-Speed Plate Penetration Dynamics*. Springer, Netherlands, 2006, 357 p.
- [18] Li Q.M., Chen X.W. Dimensionless Formulae for Penetration Depth of Concrete Target Impacted by a Non-Deformable Projectile. *International Journal of Impact Engineering*, 2003, vol. 28, pp. 93–116.
- [19] Bazhenov V.G., Bragov A.M., Kotov V.L., Kochetkov A.V. *Prikladnaya matematika i mekhanika — Journal of Applied Mathematics and Mechanics*, 2003, vol. 67, no. (4), pp. 611–620.
- [20] Savvateev A.F., Budin A.V., Kolikov V.A., Rutberg Ph.G. High-Speed Penetration into Sand. *International Journal of Impact Engineering*, 2001, vol. 26, pp. 675–681.
- [21] Jinzhu L., Zhongjie L., Hongsong Zh., Fenglei H. Perforation Experiments of Concrete Targets with Residual Velocity Measurements. *International Journal of Impact Engineering*, 2013, vol. 57, pp. 1–6.
- [22] Balagansky I.A., Merzhievsky L.A. *Deystvie sredstv porazheniya i boepripasov [Destructive effects of ammunition]*. Novosibirsk, NSTU Publ., 2012, 408 p.
- [23] Ben-Dor G., Dubinsky A., Elperin T. Engineering models of high speed penetration into geological shields. *Central European Journal of Engineering*, 2014, vol. 4, no. 1, pp. 1–19.
- [24] Ben-Dor G., Dubinsky A., Elperin T. Engineering approach to penetration modeling. *Engineering Fracture Mechanics*, 2008, vol. 75, no. 14, pp. 4279–4282.
- [25] Kar A.K. Residual velocity for projectiles. *Nuclear Engineering and Design*, 1979, vol. 53, no. 1, pp. 87–95.

Fedorov S.V., Assist. Professor, Department of High-Precision Airborne Devices, Bauman Moscow State Technical University; author of more than 300 research works in the field of explosion physics and high-speed impact. e-mail: fedorovsv@bmstu.ru

Veldanov V.A., Cand. Sc. (Eng.), corresponding member of RANS, Assoc. Professor, Department of High-Precision Airborne Devices, Bauman Moscow State Technical University; author of more than 200 research papers in the field of high-speed impact and terminal ballistics. e-mail: veldanov@bmstu.ru

Dyukov A.V., 2nd year student, Department of High-Precision Airborne Devices, Bauman Moscow State Technical University. e-mail: alexdyukov.job@yandex.ru

Guschina T.A., 2nd year student, Department of High-Precision Airborne Devices, Bauman Moscow State Technical University. e-mail: gtania12376@mail.ru