

EVALUATION OF THE RANGE OF LASER RANGE FINDERS AS A PART OF OPTO-ELECTRONIC SYSTEMS IN LOCATION OF AERIAL OBJECTS

R.A. EGUZHOKOV¹, I.M. KHMAROV¹, Cand. Sc., L.F. SHEVCHENKO¹, Cand. Sc.,
V.V. MESHKOV², Dr. Sc., G.N. MARKUSHIN³

¹Central Research Institute of Aerospace Forces of the Ministry of Defense
of Russian Federation, 32, Af. Nikitin emb., 170026, Tver,
Russian Federation, e-mail: vse_ki@mail.ru

²Tver State Technical University, 22, Af. Nikitin emb., 170026, Tver,
Russian Federation, e-mail: common@tstu.tver.ru

³JSC Production Association Ural Optical and Mechanical Plant
named after E.S. Yalamova, 33B, Vostochnaya st., 620100, Yekaterinburg,
Russian Federation, e-mail: geo@uomz.com

The issues of testing laser rangefinders on open routes when locating air objects in the near and short-wave infrared wavelength ranges are considered. A method has been developed and tested that implements the processes of measuring and calibrating signals using aerostandards. The method is based on determining the effective scattering area of airborne objects, calculating the transmission coefficients of radar optical paths, experimental measurements of the maximum tracking distances of aerostandards by laser rangefinders, determining the angles of objects from their two-dimensional images, and calculating the ranges of rangefinders when locating typical airborne objects. The results of tests of two optical-electronic systems with laser rangefinders are presented. The ranges of action of laser rangefinders were evaluated in accordance with the specified requirements.

Keywords: laser range finder, effective scattering area, air object, field measurements, tests, range, aerostandard, multichannel optoelectronic system.

Поступила в редакцию/received: 10.07.2022; после рецензирования/revised: 30.08.2022;
принята/accepted: 12.09.2022

УДК 004.94

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ОСКОЛКОВ НА СИСТЕМУ РАЗНЕСЕННЫХ ПРЕГРАД

О.Ю. ФЕДОСОВ¹, канд. техн. наук., Ю.А. ФЕДОСОВ², канд. техн. наук

¹Управление перспективных межвидовых исследований
и специальных проектов Министерства обороны РФ,
119160, Москва, Комсомольский пр., 18, e-mail: olefed78@mail.ru

²Центральный научно-исследовательский институт
Воздушно-космических сил Министерства обороны РФ,
170026, Тверь, наб. Афанасия Никитина, 32, e-mail: nicrvotver@mail.ru

© Федосов О.Ю., Федосов Ю.А., 2022

Представлена «Модель 1В» – экспериментально-теоретическая модель, предназначенная для расчета основных параметров, характеризующих процессы пробития и разрушения разнесенных преград из различных конструкционных

*Вестник Тверского государственного технического университета.
Серия «Технические науки». № 4 (16), 2022*

материалов при действии высокоскоростных осколочных элементов. Принцип разработки «Модели 1В» состоит в установлении системы уравнений и соотношений, описывающих количественные, качественные и логические связи между начальными параметрами и результатами высокоскоростного взаимодействия осколков с системой разнесенных преград.

Ключевые слова: вторичный поток, высокоскоростное воздействие, импульс, моделирование, осколочный элемент, преграда, энергия.

DOI: 10.46573/2658-5030-2022-4-117-127

ВВЕДЕНИЕ

Для создания «Модели 1В» – модели пробития разнесенных преград осколочным элементом (ОЭ) – предполагается установление количественных соотношений между исходными параметрами, влияющими на процесс пробития и разрушения преград (физико-механическими свойствами ОЭ и преград, начальной скоростью и углами встречи ОЭ с преградами, схемой расположения преград и др.), и искомыми результатами воздействия (суммарной толщиной пробитых преград, размерами разрушений в преградах, запреградными характеристиками ОЭ и вторичного потока осколков, импульсом и энергией, поглощаемой i -й преградой при воздействии осколка и т.д.). Получение таких соотношений теоретическими методами весьма затруднительно в силу сложности физических процессов, происходящих при высокоскоростном взаимодействии ОЭ с преградами, а также наличия большого количества исходных параметров, определяющих пробивное действие ОЭ по разнесенным преградам. К тому же в теоретических методах, как правило, используются обобщенные коэффициенты, зависящие от тех же параметров, определяемых экспериментальным путем [1].

Экспериментально-теоретическая разработка «Модели 1В» нужна для расчета основных параметров, характеризующих процессы пробития и разрушения разнесенных преград из различных конструкционных материалов при действии одиночных ОЭ. Она обеспечивает расчет и оценку:

- суммарной толщины пробитых преград и изменения массы, скорости, диаметра основного ОЭ до и после пробития каждой пластины;
- параметров запреградного потока осколков;
- размеров отверстий (пробоин) на каждой пластине;
- импульса и энергии, сообщенной каждой пластине.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

На рис. 1 представлены зависимости суммарной толщины пробитых преград $H_{\Sigma}(V_0)$ для однородных пакетов преград из различных материалов: стали 08, стали ЧС4, сплава ВТ14, сплава Д16Т толщиной $h_m = 2,5; 3,5; 2,0; 2,8$ мм (соответственно материалам) при расстоянии между каждой преградой $L = 100$ мм, воздействии стальным ОЭ шаровой формы $m_0 = 1,5$ г под углом $\alpha_0 = 0^\circ$ [2].

Для сравнительного анализа выбирались эксперименты, в которых толщины преград (из разных материалов) были наиболее близки друг другу [2].

На рис. 1 нанесены экспериментальные точки (цифры над ними обозначают номер соответствующего эксперимента). Сплошными линиями нанесены расчетные зависимости $H_{\Sigma}(V_0)$, полученные с помощью разработанной «Модели 1В» для одной массы ОЭ и толщины преград, используемых в экспериментах, при прочих равных условиях. Данные типичные зависимости показывают, что для процесса пробития всех материалов можно выделить четыре характерные зоны (рис. 1).

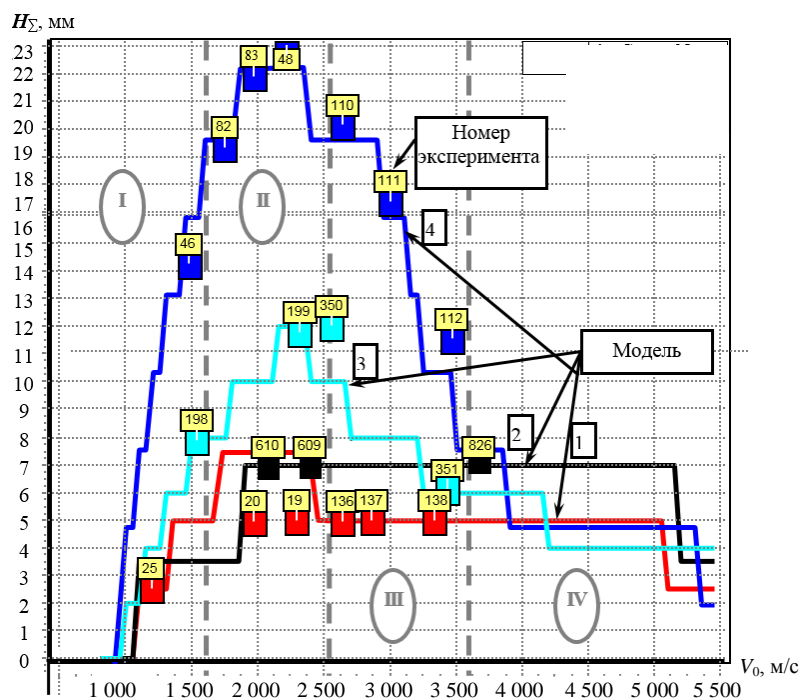


Рис. 1. Зависимость $H_{\Sigma}(V_0)$ для различных пакетов преград: 1 – сталь 08; 2 – сталь ЧС4; 3 – сплав ВТ14; 4 – сплав Д16Т; I–IV – четыре зоны для процесса пробития всех материалов

Первая зона отличается ростом пробивной способности ОЭ с возрастанием скорости воздействия до уровня $V_0 \sim 1900 \pm 200$ м/с. Вторая зона (от скорости $V_0 \sim 1900 \pm 200$ м/с) отличается прекращением роста пробивной способности вследствие начала пластических деформаций ОЭ. В этой зоне ОЭ на преградах деформируется (расплющивается), но не дробится. Третья зона (до $V_0 \sim 4000 \pm 200$ м/с) характеризуется резким снижением пробивной способности осколка вследствие его дробления. При этом чем выше скорость ОЭ, тем на более ранней преграде начинается его дробление. Характерным подтверждением этого могут служить эксперименты 110–112, отмеченные на верхней кривой на рис. 1. В эксперименте 110 ОЭ начинает дробиться лишь на четвертой преграде, в эксперименте 111 – на второй, а в эксперименте 112 ОЭ дробится уже на первой преграде.

Четвертая зона – это зона устойчиво низкой пробивной способности вследствие изменения фазового состояния ОЭ при пробитии первой преграды.

Анализ оценки пробивного действия компактного ОЭ по разнесенным преградам из разных конструкционных материалов показывает следующие моменты [2]:

1) основными параметрами, определяющими пробивную способность, являются начальная скорость и масса компактного ОЭ; скорость начала пластических деформаций $V_{пл}$ материала ОЭ, воздействующего на данную преграду; скорость $V_{др}$ начала дробления ОЭ на этой преграде; степень дробления ОЭ; степень разнесения преград; физико-механические характеристики материала преград;

2) при скорости воздействия ОЭ $V_0 > V_{др}$ его пробивная способность уменьшается вследствие дробления на мелкие фракции, причем чем больше скорость ОЭ (а следовательно, и степень дробления), тем меньше его пробивная способность;

3) степень дробления ОЭ зависит от физико-механических характеристик исследуемых материалов преград и скорости соударения;

4) расчет динамического взаимодействия и параметров процесса пробития целесообразно проводить, рассматривая комбинацию разнесенных преград из различных конструкционных материалов как систему, состоящую из пар преград, последовательно пробиваемых ОЭ.

Степень разнесения преград оказывает наибольшее влияние при скоростях воздействия ОЭ, превышающих $V_{др}$. Она определяет механизм пробития преград (начиная со второй). Влияние степени разнесения индивидуально для каждого конструкционного материала, однако экспериментально установлено, что для всех конструкционных материалов это влияние ограничено некоторым предельным расстоянием между соседними преградами, после которого оно уже не сказывается. Таким образом, задача имеет граничные условия:

а) разнесения нет ($L = 0$);

б) разнесение имеет максимальное эффективное значение ($L = L^*$).

Если преграда находится на небольшом расстоянии от первой, то ее пробитие обусловлено групповым действием фрагментов основного ОЭ, которое эквивалентно действию основного ОЭ с начальной массой m_0 , но с меньшей плотностью, уменьшающейся за счет разлета фрагментов из общего центра масс по мере удаления от первой преграды. С увеличением расстояния между преградами максимальное пробивное действие обусловлено фрагментом наибольшей массы, так как его воздействие и воздействие остального запреградного потока осколков на последующие преграды разнесено по времени. Для того чтобы с физической точки зрения правильно описать процесс пробития разнесенных преград при пластических деформациях ОЭ, необходимо ввести функцию $\gamma_i(V_{zi}, L_i)$, отражающую процесс деформации и дробления осколка на конкретном конструкционном материале, причем эта функция должна удовлетворять граничным условиям, о которых было сказано выше. Функция $\gamma_i(V_{zi}, L_i)$ определяется экспериментально для каждой соударяющейся пары ОЭ и преграды.

Для решения задачи оценки динамического взаимодействия ОЭ с разнесенными преградами из различных конструкционных материалов нужно провести стрельбовые испытания применительно к рассматриваемым материалам и диапазону условий воздействия ОЭ по преградам. На основе результатов стрельб определяются графические или аналитические зависимости, устанавливающие функциональную связь полученных результатов с исходными параметрами. Такие зависимости просты и достаточно надежны и, кроме того, наглядно показывают влияние каждого исходного параметра на процесс пробития и разрушения преград [3].

Основное достоинство «Модели 1В» заключается в том, что для нее нужно небольшое число сравнительно легко определяемых в эксперименте параметров и она довольно просто может быть реализована в существующих программах расчета динамических процессов.

Общая структура компьютерной экспериментально-теоретической «Модели 1В» представлена на рис. 2.

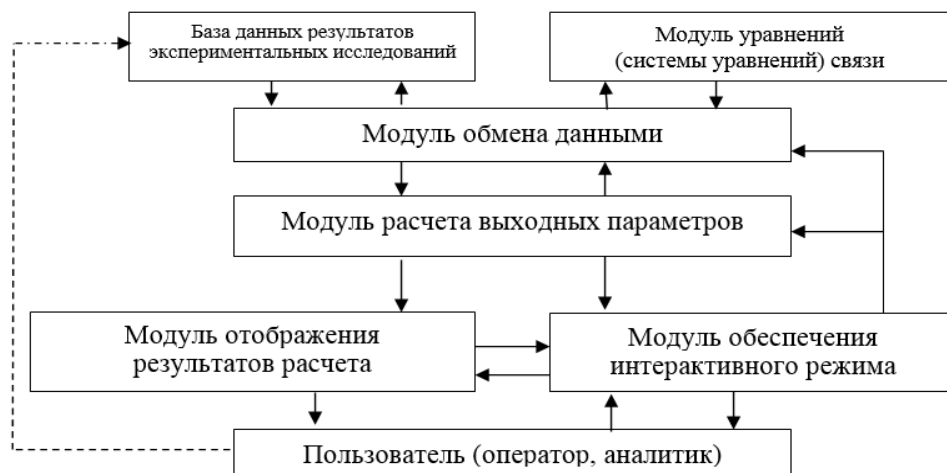


Рис. 2. Общая структура «Модели 1В»

Процесс сквозного пробития пакета разнесенных преград имеет ряд специфических особенностей, в силу которых его моделирование является нетривиальной задачей. В зависимости от скорости удара ОЭ, его материала, угла соударения, толщины экрана и прочностных свойств он может пройти через первый экран практически неповрежденным или же оказаться в раздробленном, расплавленном или частично испаренном состояниях. В связи с этим при разработке экспериментально-теоретической «Модели 1В» учитывали упругое деформирование и пластическое течение, плавление и затвердевание, испарение и конденсацию, кинетику фазовых переходов и химические превращения, изменение микроструктуры материала в процессе разрушения и обратное влияние структурных изменений на физико-механические характеристики и напряженно-деформированное состояние соударяющихся тел.

Из сказанного выше следует, что «Модель 1В» не может быть всеобъемлющей, она строится в условиях заранее оговоренных логических ограничений. Эти ограничения в итоге определяют точность разработанной модели и границы ее применения.

Принцип разработки «Модели 1В» состоит в установлении системы уравнений и соотношений, описывающих количественные, качественные и логические связи между параметрами высокоскоростного взаимодействия осколков с системой разнесенных преград. Главное требование, предъявляемое к модели, заключается в том, чтобы служить средством решения поставленных задач. Для этого необходимо, с одной стороны, обеспечить представительность модели (ее способность отображать свойства системы разнесенных преград полно и точно), а с другой – обеспечить простоту, умеренную сложность модели для ее работоспособности и приемлемого быстродействия. Эти требования противоречивы, поскольку повышение представительности достигается за счет усложнения модели.

На основе требований, предъявляемых к модели расчета процессов пробития разнесенных преград из различных конструкционных материалов, может быть сформулирована представленная ниже физико-математическая задача.

А. Входными переменными параметрами (аргументами) являются:

m_0 – начальная масса ОЭ (в диапазоне от 0,5 до 50 г);

d_0 – диаметр (характерный размер) ОЭ;

V_0 – скорость соударения ОЭ с первой преградой (500–5 000 м/с);

α_i – угол установки i -й преграды по линии стрельбы, а именно угол между нормалью к i -й преграде и линией стрельбы (в диапазоне от нормали ($\alpha_i = 0$) до угла рикошета);

ρ_o – плотность материала ОЭ (материалы: сталь, сплав на основе вольфрама ВНЖ);

K_ϕ – коэффициент формы ОЭ (1,21 для шара; 1,5 для куба);

n – количество преград;

ρ_{mi} ($i = \overline{1, n}$) – плотность материала i -й преграды (материалы: два вида стали, алюминиевый и титановый сплавы, углепластик);

h_i ($i = \overline{1, n}$) – толщина i -й преграды;

L_i – расстояние по линии стрельбы между i -й и $(i + 1)$ -й преградами.

Б. Условия и ограничения.

Схемы разнесения и пространственная ориентация преград произвольны.

Требуется для основных авиационно-космических материалов (стали, углепластика, алюминиевого и титанового сплавов) экспериментов создать математическую модель, позволяющую получить расчетным путем параметры, описывающие процесс пробития разнесенных преград осколком:

m_{zi} – эффективную массу ОЭ после пробития i -й преграды;

V_{zi} – скорость ОЭ после i -й преграды;

φ_{zi} – угол между векторами \vec{V}_{zi+1} и \vec{V}_{zi} ;

d_{zi} – характерный размер ОЭ после пробития i -й преграды;

μ_{pi} (ΔM_i) – суммарную массу вторичного потока после пробития i -й преграды (дефицит массы преграды после ее пробития осколком);

θ_{pi} – угол разлета вторичного потока после пробития i -й преграды;

V_{pi} – скорость движения центра масс вторичного потока за i -й преградой;

D_{pi} – характерные размеры разрушений в i -й преграде;

P_i – импульс, воспринимаемый i -й преградой от воздействия ОЭ;

ΔE_i – энергию, поглощаемую i -й преградой при воздействии осколка.

Таким образом, необходимо получить алгоритмы расчета десяти функциональных зависимостей от десяти заданных аргументов, т.е.

$$f_{pi}(m_o, d_o, V_o, K_\phi, \rho_o, \rho_{mi}, \alpha_i, h_i, L_i, n), \quad i = \overline{1, n}.$$

Разработка «Модели 1В» основывается:

на использовании известных экспериментальных данных и физических закономерностей процессов высокоскоростной деформации;

применении теории планирования экспериментальных исследований, позволяющей при минимальном числе опытов получить максимальную информацию (необходимую в рамках принятых ограничений);

введении необходимых ограничений параметров и условий процессов, позволяющих получить аналитические выражения закономерностей в рамках заданных требований.

Анализ различных подходов [1, 3, 4] показал, что для решения данной задачи наиболее целесообразно построить математическую модель, основанную на использовании соотношений и параметров, характерных для энергетического подхода к оценке процесса высокоскоростного взаимодействия. При этом противоречивые требования достижений высокой точности и приемлемой трудоемкости проводимых расчетов могут быть согласованы за счет упрощения расчетных схем, учитывающих

только основные закономерности протекающих физических процессов, а также введения в математическую модель специальных подстроечных параметров, численные значения которых подбираются при калибровке модели по экспериментальным данным для компенсации принятых упрощений. Таким образом, «Модель 1В» является экспериментально-теоретической и опирается на стрелбный эксперимент.

Поскольку основным предметом исследования является взаимодействие ОЭ с разнесенными преградами, то вопрос о пробитии одиночной преграды становится ключевым в логической структуре исходного процесса (первая из разнесенных преград должна быть пробита навывлет). При этом методики оценки характерных параметров процесса взаимодействия ОЭ с одиночной преградой будут служить базой при разработке расчетной модели процесса для разнесенных преград [5, 6].

Рассмотрим процесс пробития одиночной преграды ОЭ, основываясь на общефизических законах и оценке энергетических параметров процесса взаимодействия ОЭ с преградой.

В качестве основной характеристики процесса принимаем энергию, поглощаемую преградой при ее пробитии (ΔE). При этом не столь важно, в какие виды энергии она превращается (световую, тепловую, деформации и т.д.). Важна величина энергии, отобранная преградой у ОЭ. Запишем закон сохранения полной энергии для процесса взаимодействия системы «ОЭ – преграда» в виде

$$E_0 = E_3 + E_{\Pi} + \Delta E, \quad (1)$$

где $E_0 = m_0 \cdot V_0^2 / 2$ – энергия осколка до преграды; $E_3 = m_0 \cdot V_3^2 / 2$ – энергия осколка за преградой; $E_{\Pi} = \mu_{\Pi} \cdot V_{\Pi}^2 / 2$ – энергия вторичного потока осколков; m_0 – масса ОЭ; V_0, V_3 – скорость ОЭ до и после преграды; $\mu_{\Pi i} (\Delta M_i)$ – суммарная масса вторичного потока после пробития i -й преграды (дефицит массы преграды после ее пробития осколком); V_{Π} – скорость центра масс вторичного потока.

Закон сохранения импульса по оси стрельбы имеет вид

$$m_0 \cdot \vec{V}_0 = m_0 \cdot \vec{V}_3 + \mu_{\Pi} \cdot \vec{V}_{\Pi} + \vec{P}, \quad (2)$$

где \vec{P} – импульс, воспринимаемый преградой.

Из уравнений (1) и (2) получаем выражение для энергии, поглощаемой преградой:

$$\Delta E = \frac{m_0 \cdot (V_0^2 - V_3^2)}{2} - \frac{[m_0 \cdot (V_0 - V_3) - P]^2}{2 \cdot \mu_{\Pi}}. \quad (3)$$

Величины, которые находятся в правой части уравнения (3), измеряются с достаточно высокой точностью экспериментально (относительная погрешность измерений – в пределах 4 %). Таким образом, получив экспериментально зависимости для исследуемых j -х материалов преград и k -х материалов осколка в виде

$$\Delta E_{kj} = F_{kj}(E_0, K_{\Phi}) \cdot F^*_{kj}(h_1) \cdot F^{**}_{kj}(\alpha_1), \quad (4)$$

где $F_{kj}(E_0, K_{\Phi})$, $F^*_{kj}(h_1)$, $F^{**}_{kj}(\alpha_1)$ – функциональные зависимости влияния параметров осколка, толщины преграды и угла воздействия соответственно, решаем совместно систему уравнений (3) и (4) и получаем выражение для запреградной скорости ОЭ:

$$V_{3kj} = V_0 \cdot f(m_0, d_0, V_0, \alpha_1, h_1, K_{\Phi}). \quad (5)$$

Полученные эмпирические зависимости для запреградной скорости ОЭ позволяют создать алгоритм расчета суммарной толщины H_{Σ} разнесенных преград, пробиваемых осколком. С помощью этого алгоритма выявляются запреградные параметры ОЭ при представлении всей совокупности разнесенных преград как системы, состоящей из пар преград, последовательно пробиваемых осколком. При этом запреградные параметры ОЭ будут являться входными для следующей преграды. Такое построение алгоритма дает возможность проводить расчеты для схем экранирования, состоящих из преград как одного, так и различных материалов.

Блок-схема алгоритма расчета параметров процесса пробития разнесенных преград из конструкционных материалов представлена на рис. 3.

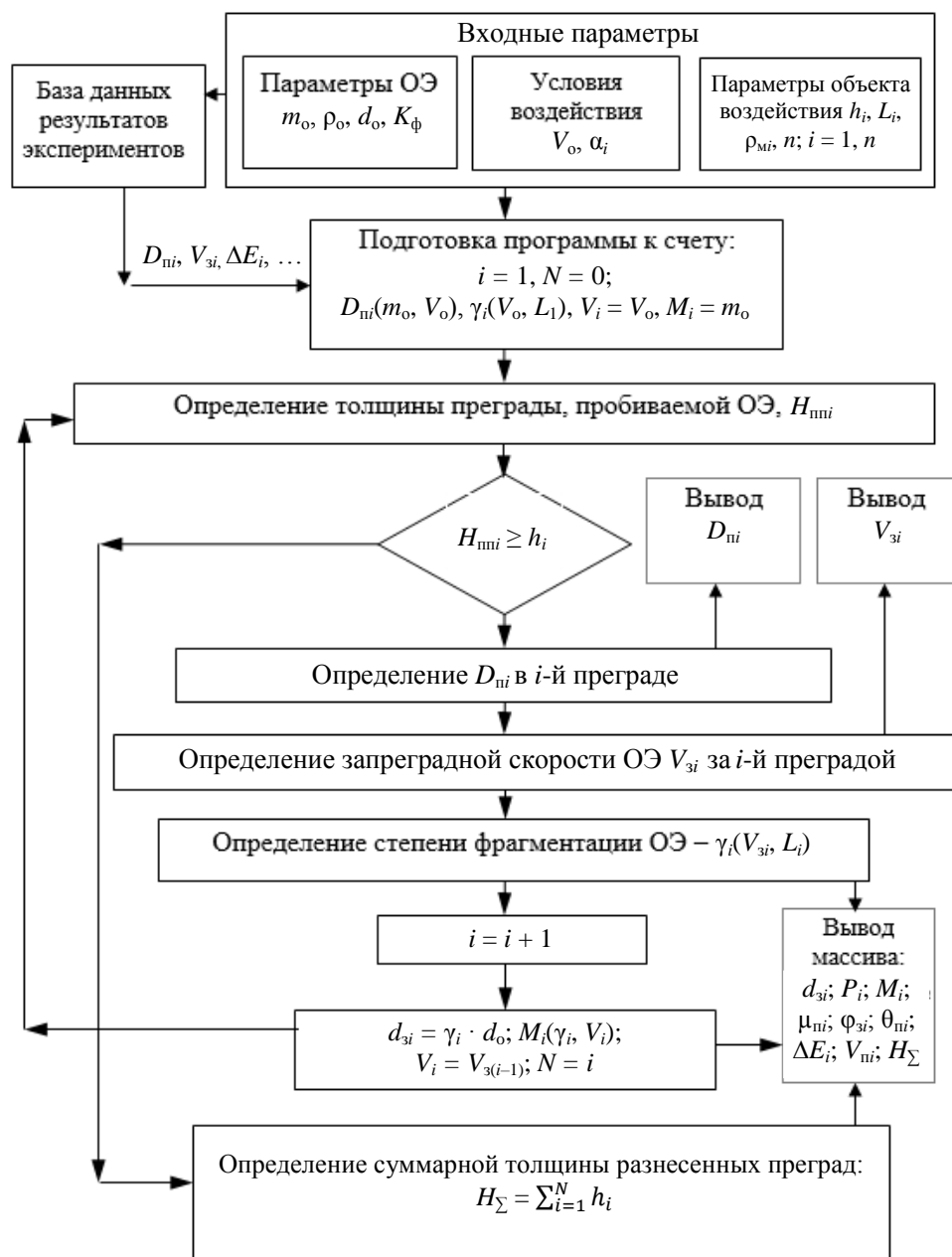


Рис. 3. Блок-схема алгоритма для расчета параметров процесса пробития разнесенных преград ОЭ

Исходными данными для математической «Модели 1В» служат:

параметры осколка $\{m_0, d_0, \rho_0, V_0, K_\phi\}$ – масса, диаметр (характерный размер), плотность, начальная скорость, коэффициент формы ОЭ;

массив параметров преград $\{h_i, \rho_{mi}, \alpha_i, L_i, n\}$ – толщина, плотность, угол установки i -й преграды, расстояние между i -й и $(I + 1)$ -й преградами, число преград.

Искомыми параметрами модели являются характеристики стойкости преград к осколочному воздействию: m_{zi}, V_{zi}, d_{zi} – масса, скорость, характерный размер ОЭ после пробития i -й преграды, а также $\mu_{pi}, V_{pi}, D_{pi}, P_i, \Delta E_i$ – суммарная масса и скорость движения центра масс вторичного потока, характерные размеры разрушений, импульс, энергия, поглощаемая i -й преградой при воздействии осколка, и H_Σ – суммарная толщина пробития разнесенных преград.

Величина H_Σ является не только количественной мерой процесса пробития разнесенных преград, но и важнейшим качественным показателем, наглядно отражающим изменение механизма высокоскоростной деформации.

По алгоритму расчета (рис. 3), если ОЭ, имеющий массу m_0 и начальную скорость V_0 , способен пробить первую преграду толщиной h_1 (т.е. $h_1 < H_{mi}$), рассчитывается диаметр повреждения в первой преграде. В зависимости, полученные на первом этапе экспериментальных исследований, подставляется вычисленное значение D_{pi} и определяется запреградная скорость ОЭ (V_{zi}). Затем целочисленной переменной N , обозначающей количество пробитых преград, присваивается значение «1», а V_1 – вычисленное значение V_{zi} и начинается расчет параметров ОЭ при пробитии второй преграды, при этом описанный алгоритм расчета рекуррентным образом повторяется до тех пор, пока будет выполняться условие $h_i < H_{mi}$. В случае невыполнения этого условия расчет прекращается и определяется суммарная толщина H_Σ пробитых N преград.

Результат моделирования – вывод массива параметров ($d_{zi}; P_i; M_i; \mu_{pi}; \Delta E_i; V_{pi}; H_\Sigma$). Параметры процесса пробития каждой преграды могут выдаваться таблично или графически, как показано на рис. 4 (пробитие шести преград). Перечень выводимых в таблицу или график параметров может быть изменен в зависимости от потребностей исследования.

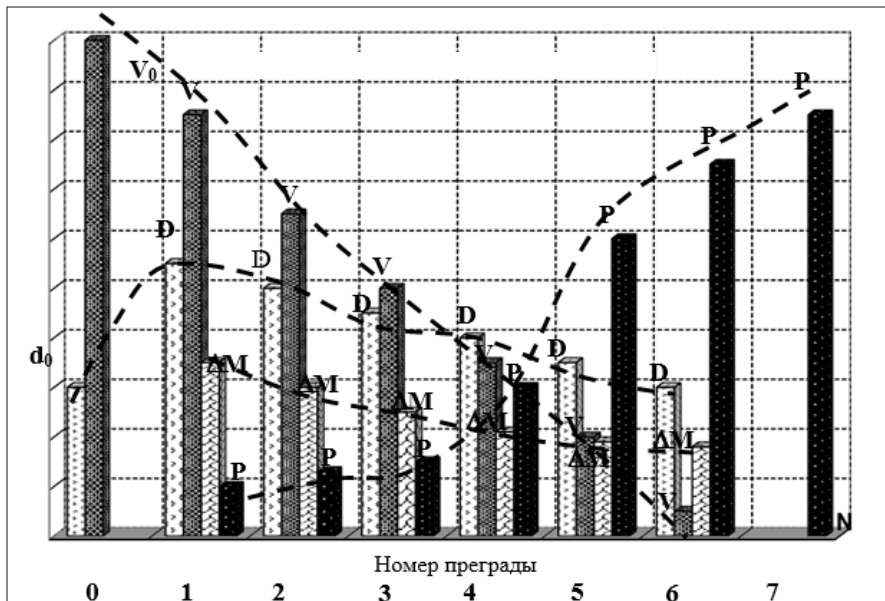


Рис. 4. Параметры процесса пробития шести преград

Расчеты на основе полученного программного комплекса целесообразно проводить при анализе и прогнозировании результатов лабораторных и натуральных экспериментов, их планировании, что позволит существенно сократить количество дорогостоящих экспериментов.

Сравнение данных математического моделирования и экспериментальных исследований показывает, что результаты моделирования удовлетворительно коррелируются с экспериментом.

На рис. 1 видно хорошее совпадение результатов моделирования с результатами экспериментальных исследований для четырех видов исследованных материалов преград во всем заданном диапазоне начальной скорости ОЭ от 500 до 4 000 м/с. Точки на рис. 1 соответствуют результатам экспериментов, а линии представляют собой прогноз результатов, полученных с помощью «Модели 1В».

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье была представлена экспериментально-теоретическая «Модель 1В», которая предназначена для расчета основных параметров, характеризующих процессы пробития и разрушения разнесенных преград из различных конструкционных материалов при действии высокоскоростных ОЭ.

Использование «Модели 1В» позволяет обеспечить:

расчет и наглядное отображение расчетных оценок одного или нескольких выходных параметров для заданных в интерактивном режиме входных переменных в соответствии с выбранным режимом отображения;

расчет и наглядное отображение корреляционных зависимостей оценок выходных параметров от входных переменных;

формульное отображение уравнений, на основе которых производятся расчеты по оценке выходных параметров;

выборку из базы данных результатов экспериментальных исследований для наглядного отображения и последующего статистического анализа.

ЛИТЕРАТУРА

1. Хабибуллин М.В. Численное моделирование взаимодействия высокоскоростного ударника с системой пространственно разнесенных мишеней // *ВАНТ. Серия «Математическое моделирование физических процессов»*. 1997. Вып. 3. С. 18–24.

2. Экспериментальные исследования процессов пробития разнесенных стальных преград при действии высокоскоростных компактных осколочных элементов. НТО о НИЭР «Броня-Т». Тверь: ГУП 2 ЦНИИ МО РФ. 2003. 68 с.

3. Экспериментальные исследования процессов пробития разнесенных преград из алюминиевого сплава Д16Т при действии высокоскоростных компактных осколочных элементов. НТО о НИР «Броня-Т 2МО». Тверь: ГУП 2 ЦНИИ МО РФ. 2002. 151 с.

4. Теоретические и экспериментальные исследования высокоскоростного взаимодействия тел / под ред. А.В. Герасимова. Томск: ТГУ. 2007. 572 с.

5. Meshkov V.V., Fedosov Y.A., Filatova N.N. An integrated system for modeling hypervelocity interaction of solids // *Acta Astronautica*. 2021. V. 178. P. 606–615.

6. Иницирующее и зажигательное действие боевых частей зенитных ракетных комплексов: учебное пособие / В.М. Кашин [и др.]; под ред. В.М. Кашина. СПб.: БГТУ. 2009. 244 с.

Для цитирования: Федосов О.Ю., Федосов Ю.А. Моделирование высокоскоростного воздействия осколков на систему разнесенных преград // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2022. № 4 (16). С. 117–127.

**OF HIGH-SPEED IMPACT OF FRAGMENTS
ON A SYSTEM MODELING
OF SPACED BARRIERS**

O.Yu. FEDOSOV¹, Cand. Sc., Yu.A. FEDOSOV², Cand. Sc.

¹Department of Advanced Interspecific Research and Special Projects Ministry of Defense of Russian Federation, 18, Komsomolsky Ave., 119160, Moscow,
Russian Federation, e-mail: olefed78@mail.ru

²Central Research Institute of the Russian Ministry of Defense,
32, Af. Nikitin emb., 170026, Tver,
Russian Federation, e-mail: nicpvotver@mail.ru

The experimental-theoretical model «Model 1B» is presented, designed to calculate the main parameters characterizing the processes of penetration and destruction of spaced barriers made of various structural materials under the action of high-speed fragmentation elements. The principle of developing the «Model 1B» is to establish a system of equations and relations describing quantitative, qualitative and logical connections between the initial parameters and the results of high-speed interaction of fragments with a system of spaced barriers.

Keywords: secondary flow, high-speed impact, pulse, simulation, fragmentation element, barrier, energy.

Поступила в редакцию/received: 17.07.2022; после рецензирования/revised: 30.08.2022;
принята/accepted: 12.09.2022