

## Модель процесса проникания составного удлиненного поражающего элемента в экранированную преграду\*

И. Б. Чепков<sup>а</sup>, С. А. Лавриков<sup>б</sup>

<sup>а</sup> Центральный научно-исследовательский институт вооружения и военной техники Вооруженных Сил Украины, Киев, Украина

<sup>б</sup> Государственный научно-технический центр артиллерийско-стрелкового вооружения, Киев, Украина

*Теоретически изучен механизм деформирования и разрушения составных удлиненных поражающих элементов, проникающих в экранированную преграду. При исследовании процесса проникания рассмотрены теплофизические и механические характеристики материалов, толщина экрана, геометрические размеры составных частей (лидирующей и головной), а также условия соударения с преградой. Численное моделирование выполнено с помощью программного комплекса *LasTap 2D Impact*, в основу которого положен метод конечных элементов. Модель проникания позволила изучить особенности деформирования и разрушения составных удлиненных поражающих элементов при взаимодействии с экранированными преградами. Анализ полученных результатов показал, что наибольший уровень разрушений составного удлиненного поражающего элемента наблюдается в лидирующей части вследствие деформаций сдвига и растяжения.*

**Ключевые слова:** удлиненный поражающий элемент, проникание, контактное взаимодействие, разрушение, экранированная преграда.

### Обозначения

- $p$  – давление
- $\rho_0$  – начальная плотность
- $\rho$  – текущая плотность материала
- $\Gamma$  – коэффициент Грюнайзена
- $K$  – модуль объемного сжатия
- $E$  – удельная внутренняя энергия
- $u_s$  – скорость фронта ударной волны
- $u_p$  – массовая скорость вещества за фронтом волны
- $C_0$  – начальная скорость звука в материале
- $\sigma$  – динамический предел текучести
- $\varepsilon^P$  – интенсивность пластических деформаций
- $\varepsilon'^P$  – скорость пластических деформаций
- $\varepsilon'_0$  – пороговое значение скорости пластических деформаций
- $T$  – температура
- $T_0$  – начальное значение температуры
- $T_m$  – температура плавления
- $A$  – статический предел текучести

\* Доклад на IV Международном симпозиуме “Прочность и разрушение материалов и элементов конструкций при импульсном нагружении” (IMPULSE-2001).

- $B$  – модуль деформационного упрочнения  
 $C$  – коэффициент скорости деформаций  
 $n$  – показатель степени в законе деформационного упрочнения  
 $k$  – показатель степени в законе упрочнения, обусловленного скоростью деформаций  
 $m$  – показатель степени в законе температурного разупрочнения  
 $C_p$  – удельная теплоемкость  
 $H_m$  – удельная теплота плавления (скрытое тепло)  
 $C_p^0$  – удельная теплоемкость при начальной температуре  
 $C_p^m$  – удельная теплоемкость материала в жидком состоянии при температуре плавления  
 $\sigma_{ij}$  – компоненты тензора напряжений  
 $\varepsilon_{ij}^p$  – компоненты тензора скоростей пластических деформаций  
 $t$  – время  
 $\Delta L$  – лидирующая часть, которая срабатывается при проникании в экранированную преграду

**Введение.** Рассмотрению приближенных способов оценки воздействия удлиненного поражающего элемента на преграды посвящен ряд работ [1, 2]. Известные расчетные методики основаны на полуэмпирическом подходе, требующем постановки большого количества экспериментов. Они могут быть использованы для оценки результатов взаимодействия только в том диапазоне скоростей, в котором получены полуэмпирические зависимости [3], и для решения относительно простых задач.

Значительный рост исследований в области создания удлиненных поражающих элементов с повышенной проникающей способностью обусловил появление поражающих элементов нетрадиционной формы. Вместо монолитных однородных стержней, изготовленных из твердых тяжелых сплавов на основе вольфрама либо обедненного урана, начинают широко применяться составные стержни сегментного, телескопического и сегментно-телескопического типа [4–7]. Изменяется и форма сечения ударника: предлагаются поражающие элементы в форме пустотелого цилиндра, крестообразного профиля и др. [8].

**Исходные предпосылки.** Теоретические исследования [9] проникания сегментного ударника, изготовленного из сплава на основе вольфрама, показали, что в зависимости от соотношения длины сегмента к его диаметру и расстояния между сегментами глубина проникания сердечника может быть увеличена до 40% по сравнению с монолитными однородными сердечниками той же массы и того же диаметра. Следует отметить, что в работах [6, 7, 9] рассматривались как монолитные преграды большой толщины, так и многослойные. Однако широкое использование экранированных преград для защиты различных объектов привело к необходимости разработки методик, позволяющих моделировать процесс взаимодействия удлиненных поражающих элементов различных типов со сложными экранированными преградами.

**Постановка задачи.** Для исследования механизма проникания составного удлиненного поражающего элемента в экранированную преграду необходимо рассматривать: разрушение лидирующей части и основного поражающего элемента; поглощение части кинетической энергии демпфирующей прокладкой; изменение вектора скорости поражающего элемента и отклонение оси снаряда от касательной к траектории полета. Степень влияния этих факторов зависит от механических характеристик материала, а также условий соударения ударника с преградой (скорость и угол встречи). Выполнение данных исследований в полном объеме экспериментальными методами трудоемко и очень дорого, а также требует применения специального экспериментального, измерительного и регистрирующего оборудования. Поэтому в качестве основного метода при проведении исследований были выбраны методы численного моделирования с использованием программного комплекса *LasTan 2D Impact* [10–12] и описанных в литературных источниках экспериментальных данных о механических и теплофизических характеристиках применяемых материалов. Численное моделирование проникания составного удлиненного поражающего элемента не только не ограничивает условия взаимодействия, но и обеспечивает физически обоснованный прогноз результатов проникания твердых деформируемых тел, в частности позволяет оценить пробивную способность поражающего элемента различной формы по той или иной конструкции преграды.

**Особенности математической модели динамических процессов контактного взаимодействия.** Рассматривается методика численного моделирования процесса проникания составного удлиненного поражающего элемента в экранированную преграду и теоретически изучается механизм деформирования и разрушения вследствие их взаимодействия.

При построении математической модели процессов высокоскоростного контактного взаимодействия предполагалось, что настоящая физическая система состоит из одного или нескольких материальных тел, изготовленных из поликристаллических материалов и подверженных воздействию тепловой и механической нагрузок. Потoki тепловой и механической энергии рассматриваются как единственно возможный механизм обмена с окружающей средой.

В формулировку физической модели включены следующие предположения:

в исходном состоянии в материале отсутствуют начальные напряжения и деформации, а тело находится в тепловом равновесии;

в процессе деформирования сохраняется неразрывность компонент материала;

к макроскопическим деформациям и температурным изменениям могут приводить лишь те процессы и явления, которые происходят в самой системе при условии, что они соответствуют заданным источникам энергии и в явной форме зависят от координат и времени;

тепловые режимы и уровни напряжений могут приводить к фазовым изменениям в материале;

термомеханическое поведение материала зависит от скорости деформирования и истории нагружения;

макроскопические деформации среды оказываются конечными в том смысле, что перемещения материальных точек и градиенты перемещений в процессе деформирования нельзя считать бесконечно малыми;

при больших скоростях деформирования между отдельными телами имеет место лишь идеальный контакт.

Указанные предположения позволили представить математическую модель процессов проникания удлиненного поражающего элемента в преграду с использованием нелинейных уравнений двумерной контактной задачи термоупруговязкопластичности для структурно-однородных упрочняющихся поликристаллических материалов при нестационарном термосиловом нагружении. При этом учитывались характер деформаций и перемещений, эффекты термомеханической связности, зависимости механических свойств материалов от температуры, возможные разрушения соударяемых тел в результате образования трещин и выноса материала тел вследствие их оплавления.

Задача определения термомеханического состояния элементов конструкций под воздействием динамических тепловых и механических нагрузок сведена к рассмотрению балансных уравнений термодинамики сплошных сред, имеющих форму уравнений сохранения масс, момента и энергии.

Уравнения нестационарной теплопроводности, включающие эффекты упругой и неупругой работы и фазовых изменений, получали из первого закона термодинамики в виде отношения температурной диффузии и конвекции к скорости производства скрытого тепла при фазовых превращениях.

Решение задачи термоупруговязкопластичности основывалось на теории инкрементальной пластичности с критерием текучести Мизеса. Предполагалось, что материалы рассматриваемых тел могут быть идеально упругопластическими, а также подчиняться полилинейным либо степенным законам упрочнения. Их поведение, зависящее от времени, учитывалось путем добавления приращений вязких деформаций к приращениям упругих и пластических деформаций для формирования приращений полных деформаций. При этом использовалось соотношение между скоростью вязких деформаций и эффективным напряжением в виде степенного закона, которое являясь аналогом модели Пэжины, описывает скорость вязкопластических деформаций в виде функции вязкости и напряжения текучести материала, а также девиаторного напряжения и напряжения разгрузки. Предел текучести принимался равным нулю при температуре плавления, когда определяющее соотношение соответствует вязкой жидкости Максвелла. В случае более низких температур вязкостными эффектами пренебрегали, и модель описывала упругопластическое деформирование, не зависящее от времени.

С целью задания функциональной зависимости механических и теплофизических свойств материалов от температуры предполагалось использование сплайн-интерполяции требуемых величин на совокупности соответствующих температурных реперных точек.

Для решения указанных нелинейных эволюционных краевых задач в неоднородных областях с границами, форма и закон движения которых заранее неизвестны, предложен численный шаговый по времени подход, предполагающий использование метода конечных элементов для дискрет-

ного представления области решения задачи (по пространственным переменным) и метода конечных разностей для интегрирования по времени уравнений динамического равновесия дискретной модели.

Подробное описание математической модели, методов и алгоритмов ее реализации приведено ранее [10].

Модель высокоскоростного процесса контактного взаимодействия твердых тел базируется на основных уравнениях сохранения механики сплошных сред [10], дополненных полуэмпирическими соотношениями, необходимыми для описания поведения металлов при интенсивных динамических нагрузках:

уравнение состояния;

модель для описания зависимости предела текучести от достигнутого уровня пластических деформаций, скорости пластических деформаций, плотности материала и температуры;

модель формирования разрушения в структуре материала;

модель, учитывающая влияние разрушений на предел текучести и модуль сдвига.

Уравнение состояния характеризует термодинамическую реакцию материала на приложенные нагрузки (механические, тепловые и т.д.). В данном случае использовалось уравнение для растянутого материала:

$$p = K \left( \frac{\rho}{\rho_0} - 1 \right) + \Gamma \rho_0 E \quad (1)$$

и уравнение состояния Ми–Грюнайзена для сжатого [13]:

$$p = p_h + \rho_0 \Gamma (E - E_h), \quad (2)$$

где

$$p_h = \frac{\rho_0 C_0^2 \eta}{(1 - s\eta)^2}; \quad E_h = \frac{1}{2} \eta \frac{p_h}{\rho_0}; \quad \eta = 1 - \frac{\rho_0}{\rho}.$$

Величина  $s$  определяется из уравнения ударной адиабаты, которая для большинства металлов описывается линейным уравнением [13]

$$u_s = C_0 + s u_p. \quad (3)$$

Для обеспечения возможности учета зависимости прочностных характеристик (предела текучести и модуля сдвига) от параметров нагружения (скорости пластических деформаций, достигнутого уровня пластических деформаций и температуры) применялась модель Джонсона–Кука [14–16]. При этом, согласно данной модели, динамический предел текучести определяется соотношением

$$\sigma = [A + B(\varepsilon^p)^n] \left[ 1 + C \left( \ln \left( \frac{\varepsilon'^p}{\varepsilon'_0} \right) \right)^k \right] \left[ 1 - \left( \frac{T - T_0}{T_m - T_0} \right)^m \right],$$

$$C \ln \left( \frac{\varepsilon'^p}{\varepsilon'_0} \right) = 0, \quad \text{если } \varepsilon'^p < \varepsilon'_0 \quad (\varepsilon'_0 = 1,0 \text{ с}^{-1}).$$

Это уравнение следует дополнить аналогичным выражением, описывающим зависимость модуля сдвига от температуры [17].

Процессы, протекающие в удлинённом поражающем элементе и преграде при соударении, обычно весьма скоротечны. Скорость распространения волн напряжений на несколько порядков превышает скорость распространения тепловых возмущений, поэтому полагали, что тепловая составляющая удельной внутренней энергии материала изменяется только лишь за счет работы необратимых пластических деформаций. Изменение температуры среды находили с помощью соотношения [17]

$$dT = \begin{cases} \frac{1}{C_p} d(e - e_h), & T \leq T_m; \\ \frac{1}{C_p} d(e - e_h - H_m), & T > T_m. \end{cases}$$

Зависимость удельной теплоемкости от температуры считаем линейной:

$$C_p = \begin{cases} C_p^0 + \frac{C_p^m - C_p^0}{T_m - T_0} (T - T_0), & T \leq T_m; \\ C_p^m, & T > T_m. \end{cases}$$

При ударном взаимодействии в материале поражающего элемента и преграды наблюдаются различные виды повреждений:

- нормальный отрыв под действием растягивающих напряжений;
- образование полос сдвига за счет сдвиговых деформаций.

Разрушение по типу отрыва происходит в процессе зарождения, роста и слияния микропор под действием растягивающих напряжений. Поэтому полагали, что в некоторой точке среды имеет место разрушение типа нормального отрыва, если относительный объем пор в элементарном объеме, содержащем рассматриваемую точку, достигает предельного для данного материала значения (для броневых сталей средней твердости 0,1... 0,3).

Разрушения в материале от сдвига могут наступить в том случае, если удельная работа на накопленных пластических деформациях превышает критическую величину  $A^*$ :

$$\int_0^t \frac{1}{\rho} \sigma_{ij} \varepsilon'_{ij}{}^p dt \leq A^*.$$

После выполнения в некоторой точке среды любого из указанных критериев прочностные характеристики материала корректировались. В итоге после разрушения материал представлялся средой, которая не способна сопротивляться растяжению и сдвигу.

Численные эксперименты проводились при скорости соударения удлиненного поражающего элемента с преградой от 1700 м/с и выше. Время моделирования в каждом случае ограничивалось моментом полной остановки либо разрушения ударника.

На рис. 1 и 2 приведены распределения полей скоростей и гидростатического давления (шарового тензора напряжений) в момент времени  $t = 36$  мкс для составного удлиненного поражающего элемента, скорость которого при преодолении экранированной преграды составляла 1700 м/с.

Анализ результатов показал, что наибольший уровень разрушений составного удлиненного поражающего элемента наблюдается в лидирующей части вследствие деформаций сдвига и растяжения.

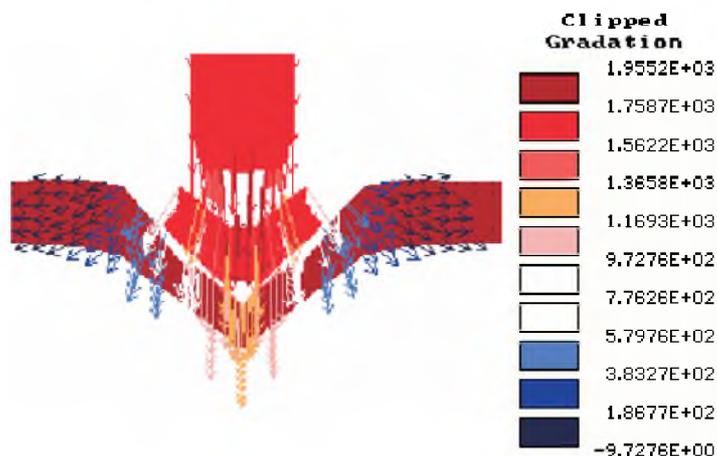


Рис. 1. Поле скоростей при проникании поражающего элемента в преграду в момент времени  $t = 36$  мкс.

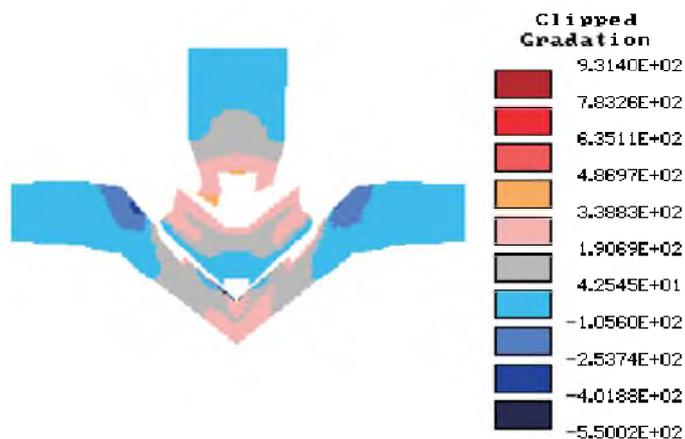


Рис. 2. Распределение давления при проникании поражающего элемента в преграду в момент времени  $t = 36$  мкс.

С целью выявления закономерностей проникания составных удлиненных поражающих элементов были определены оптимальные соотношения геометрических размеров лидирующей части и демпфирующей прокладки в зависимости от скорости удара и толщины экрана. На рис. 3, 4 представлены соответственно зависимости срабатывания лидирующей части и снижения линейной скорости от толщины экрана.

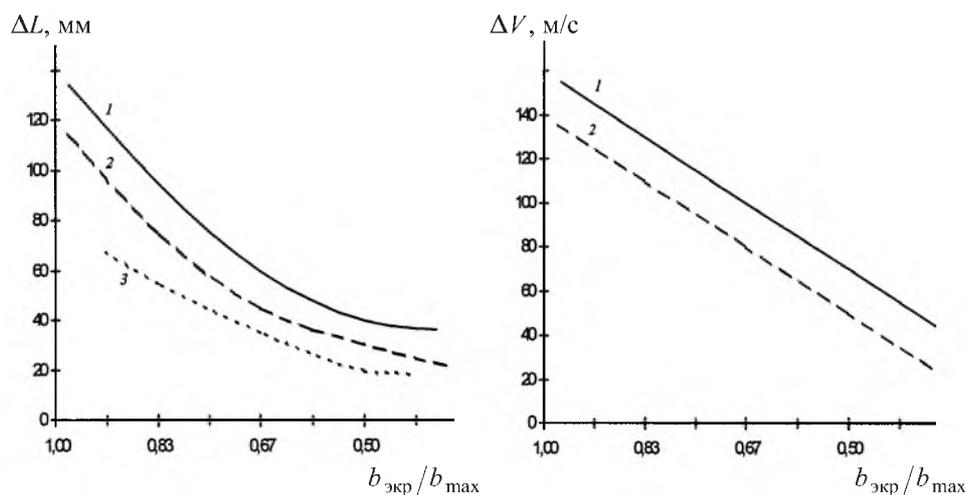


Рис. 3. Срабатывание лидирующей части удлиненного поражающего элемента  $\Delta L$  в зависимости от относительной толщины экрана: 1, 2 – экранированная стальная преграда; 3 – монолитная.

Рис. 4. Зависимость снижения линейной скорости удлиненного поражающего элемента  $\Delta V$  от относительной толщины экрана: 1 – экранированная стальная преграда; 2 – монолитная.

Оптимальная длина демпфирующей прокладки удлиненного поражающего элемента определялась в зависимости от отношения длины лидирующей части к диаметру поперечного сечения и скорости соударения.

Проникающая способность составного удлиненного поражающего элемента существенно выше, чем сплошного элемента, что связано со скоростью соударения и отношением длины лидирующего элемента к его диаметру.

Анализ результатов показал, что при преодолении экранированной преграды происходит разрушение лидирующего элемента без разрушения основного сердечника.

**Заключение.** Предложенная модель процесса проникания составного удлиненного поражающего элемента в преграду основана на использовании нелинейных уравнений двумерной контактной задачи термоупруговязкопластичности для структурно-однородных упрочняющихся поликристаллических материалов при нестационарном термосиловом нагружении. При этом учитывались характер деформаций и перемещений, эффекты термомеханической связности, зависимости механических свойств материалов от температуры, возможные разрушения соударяемых тел в результате образования трещин и выноса материала тел вследствие их оплавления.

Проведенные теоретические исследования позволили изучить механизм деформации и разрушения составных удлиненных поражающих элементов

при взаимодействии с экранированной преградой в различных условиях соударения. Выявленные закономерности проникания поражающих элементов позволили выработать рекомендации по выбору оптимальных размеров лидирующего элемента.

## Резюме

Теоретично вивчено механізм деформування і руйнування складених подовжених уражаючих елементів, які проникають в екрановану перешкоду. При дослідженні процесу проникання розглядалися теплофізичні і механічні характеристики матеріалів, товщина екрана, геометричні розміри складових частин (лідуючої і головної), а також умови співудару з перешкодою. Числове моделювання виконувалося за допомогою програмного комплексу *LasTan 2D Impact*, що базується на методі скінченних елементів. Модель проникання дозволила вивчити особливості деформування і руйнування складених подовжених уражаючих елементів при взаємодії з екранованими перешкодами. Аналіз результатів показав, що найбільший рівень руйнувань складеного подовженого уражаючого елемента відбувається в лідуючій частині внаслідок деформацій зсуву і розтягу.

1. *Tate A.* Long rod penetration models. A flow field model for high speed long rod penetration // *Int. J. Mech. Sci.* – 1986. – **28**, No. 8. – P. 535 – 548.
2. *Dehn J.* A unified theory of penetration // *Int. J. Eng.* – 1987. – **5**. – P. 239 – 248.
3. *Nixdorff K.* Applicatio of the penetration theory of Awerbuch and Bodner on multilayered targets // *Z. Angew. Math. Mech.* – 1984. – **64**, No. 4. – P. 234 – 246.
4. *Brissenden C.* Performance of novel KE penetrator designs over the velocity range 1600 to 2000 m/s // *Proc. 13th Int. Symp. on Ballistics.* – Stockholm, Sweden. – 1992. – **3**. – P. 185 – 192.
5. *Lynch N. J., Subramanian R., Brissenden C., and Shears P.* Terminal ballistic performance of novel KE projectiles // *Proc. 15th Int. Symp. on Ballistics.* – Jerusalem, Israel. – 1995. – **1**. – P. 35 – 42.
6. *Westerling L., Lundberg P., Holmberg L., and Lundberg B.* High velocity penetration of homogeneous, segmented and telescopic projectiles into alumina targets // *Proc. of the 1996 Hypervelocity Impact Symp.* – Freiburg, Germany. – 1997. – **20**, Nos. 6–10. – P. 817 – 827.
7. *Wang X., Zhao C., Shen P., and Zha H.* High velocity impact of segmented rods with an aluminum carrier tube // *Proc. of the 1994 Hypervelocity Impact Symp.* – Santa Fe (New Mexico), USA. – 1995. – **17**, Nos. 1–6. – P. 915 – 923.
8. *Anderson C. E., Jr., Subramanian R., Walker J. D. et al.* Penetration mechanics of seg-tel penetrators // *Proc. of the 1996 Hepervelocity Impact Symp.* – Freiburg, Germany. – 1997. – **20**, Nos. 1–5. – P. 13 – 26.

9. Лавриков С. А. Математическое моделирование процесса пробивания брони сердечниками нетрадиционной формы // Тр. III Междунар. конф. "Артиллерийские ствольные системы, боеприпасы, средства артиллерийской разведки и управления огнем" (Киев, сент. 1999 г.). – Киев: ГНТЦ АСВ, 1999. – С. 17 – 31.
10. Лавриков С. А. Численное моделирование процессов контактного взаимодействия твердых тел // Тр. I Междунар. конф. "Артиллерийские ствольные системы, боеприпасы, средства артиллерийской разведки и управления огнем" (Киев, сент. 1997 г.). – Киев: ГНТЦ АСВ, 1997. – С. 47 – 74.
11. Bondarenko L. I., Lavrikov S. A., and Tyrinov A. I. Finite element analysis of hypervelocity contact, impact and penetration // Proc. 3rd Solid Mech. Conf. "EUROMECH". – Stockholm (Aug. 18–22, 1997). – 56 p.
12. Лавриков С. А. Программный комплекс для моделирования процессов контактного взаимодействия твердых тел // Тр. II Междунар. конф. "Артиллерийские ствольные системы, боеприпасы, средства артиллерийской разведки и управления огнем" (Киев, окт. 1998 г.). – Киев: ГНТЦ АСВ, 1998. – С. 36 – 51.
13. Уилкинс М. Л. Расчет упругопластических течений // Вычислительные методы в гидродинамике. – М.: Мир, 1967. – С. 212 – 263.
14. Johnson G. R. and Holmquist T. J. An improved constitutive computational model for brittle materials // High Pressure Science and Technology. – 1993. – 2. – AIP Press, NY, 1994. – P. 981 – 984.
15. Johnson G. R. and Cook W. H. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates, and high temperatures // Proc. 7th Int. Symp. on Ballistics. – Hague, Netherlands, 1983. – P. 541 – 547.
16. Lundberg P., Westerling L., and Lundberg B. Influence of scale on the penetration of tungsten rods into steel-backed alumina targets // J. Impact Eng. – 1996. – 18, No. 4. – P. 403 – 416.
17. Горельский В. А., Зелепугин С. А., Сидоров В. Н. Численное решение трехмерной задачи высокоскоростного взаимодействия цилиндра с недеформированной преградой с учетом температурных эффектов // Прикл. механика. – 1994. – 30, № 3. – С. 35 – 40.

Поступила 24. 07. 2001