

УДК 539.3

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СОУДАРЕНИЯ ДЛИННЫХ СТЕРЖНЕЙ СО СЛОИСТО-РАЗНЕСЕННЫМИ ПРЕГРАДАМИ

Герасимов Александр Владимирович,

д-р физ.-мат. наук, профессор каф. теоретической и промышленной
теплотехники Энергетического института Национального
исследовательского Томского политехнического университета,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30. E-mail: ger@mail.tomsknet.ru

Актуальность работы обусловлена необходимостью защиты космической техники от техногенных осколков.

Цель работы: обоснование применимости трехмерной численной методики, базирующейся на лагранжевом подходе к описанию поведения сплошной среды и вероятностном подходе к фрагментации твердых тел при ударном нагружении применительно к проблеме защиты космических и наземных объектов комбинированными преградами при взаимодействии с удлинёнными ударниками-стержнями.

Методы исследования: вычислительный эксперимент с привлечением экспериментальных данных для верификации численных результатов.

Результаты: Вероятностный подход и предложенная в работе численная методика в наиболее полной, с физической точки зрения, трехмерной постановке позволяют с достаточно высокой точностью воспроизводить процессы пробития многослойных и разнесенных преград высокоскоростными стержневыми элементами. Внесение случайного распределения начальных отклонений прочностных свойств от номинального значения в физико-механические характеристики тела приводит к тому, что в этих случаях процесс разрушения приобретает вероятностный характер, что более соответствует экспериментальным данным. Эффективность разнесенных и слоисто-разнесенных преград, широко используемых в настоящее время в качестве защитных устройств, связана помимо гидродинамического и прочностного сопротивления прониканию также с потерей устойчивости, пластическими деформациями и разрушением стержней. Совокупность указанных процессов приводит к появлению углов нутации, отклонению вектора скорости и траектории остатка стержня и его фрагментов, а в конечном счете к уменьшению глубины проникания в слоисто-разнесенную конструкцию по сравнению с недеформируемым стержнем. В расчетах также моделируются осколочные поля и учитывается взаимодействие осколков между собой и с элементами многослойной преграды. Полученные результаты позволяют оптимизировать защиту объектов по массово-геометрическим параметрам. Важным применением предложенного подхода является исследование деформирования, разрушения и способов защиты трубопроводов от взрывного и ударного воздействия.

Ключевые слова:

Численное моделирование, эксперимент, высокоскоростные ударники, вероятность, фрагментация, космический мусор, трубопроводы, защита.

Проблема взаимодействия конструкций с высокоскоростными ударниками приобретает в настоящее время особое значение в связи с увеличивающейся скоростью соударения, что повышает вероятность пробития, разрушения и нарушения нормального функционирования защищаемых объектов. Задачи деформирования, разрушения и защиты трубопроводов являются важным классом подобных объектов, которым уделяется большое внимание исследователей [1, 2]. Эти конструкции широко применяются как в земных, так и космических условиях. Особенно остро в последнее время встала проблема надежной защиты пилотируемых и автоматических аппаратов для исследования околоземного и дальнего космического пространства в связи с увеличивающейся продолжительностью полетов указанных объектов, что повышает вероятность столкновения последних с техногенными осколками, образовавшимися в результате разрушения орбитальных конструкций. Эффективность разнесенных и слоисто-разнесенных преград, широко используемых в настоящее время в качестве защитных устройств, связана помимо гидродинамического и прочностного сопротивления прониканию также с потерей устойчивости, пластическими деформациями и разрушени-

ем стержней. Совокупность указанных процессов приводит к появлению углов нутации, отклонению вектора скорости и траектории остатка стержня и его фрагментов, а в конечном счете к уменьшению глубины проникания в слоисто-разнесенную конструкцию по сравнению с недеформируемым стержнем. Таким образом, оценкой сверху глубины проникания является вариант, когда стержень проникает без потери устойчивости и дробления на фрагменты, а только испытывает эрозию головной части. Получение таких верхних оценок необходимо для построения инженерных методик определения глубины проникания. В данной работе рассмотрены максимальные значения глубины проникания из экспериментальной базы данных, т. е. та часть экспериментов, где разрушение стержня менее всего влияло на конечный результат. В расчетах рассмотрены условия нагружения, где эрозия стержня приводит к постепенному уменьшению длины остатка стержня по мере его внедрения в слоисто-разнесенную либо разнесенную конструкции.

Пробитие по нормали к поверхности слоистых преград рассматривалось в [3, 4]. Между слоями из металлических пластин помещался слой керамики. В [5] на основе модели расширения пластично-

го отверстия сравниваются две модели пробития пластичной металлической пластины жестким остроконечным ударником. Экспериментально-теоретическое исследование взаимодействия ударников с двумя различными формами носовой части с алюминиевой однослойной пластиной проведено в [6]. Влияние формы ударника и угла соударения на баллистический предел и механизм разрушения толстых однослойных стальных пластин исследовано в работе [7]. В [8] с использованием аналитического метода показано, что слоистость не улучшает баллистические свойства пластичных пластин, пробиваемых скоростными остроносими ударниками. Простая модель проникания длинного стержня рассмотрена в [9]. Модель, базирующаяся на режиме установившейся пенетрации, предсказывает глубину кратера от стержня, проникающего в полубесконечную преграду. В модели учитывались прочностные свойства и феномен эрозии соударяющихся материалов. Были проведены сравнения с имеющимся экспериментом. В работе [10] экспериментально, с использованием аналитического и численного моделирования, было проведено изучение баллистического сопротивления алюминиевых пластин из сплава 6061-T6 подвергнутых нормальному удару пуля небольшого калибра и при стандартных скоростях. Низкоскоростное (20...300 м/с) пробитие пластин из алюминиевых сплавов рассмотрено в [11]. Основное внимание уделено цилиндрическим ударникам с различными формами носика. С результатами баллистического эксперимента [12, 13] сравнивались данные компьютерного моделирования. Сравнение проводилось по следующим параметрам: остаточной скорости и остаточной длине стержня после пробития первой преграды. Метание стержней в разделяющемся ведущем устройстве проводили на двухступенчатой легкогазовой установке ГУ-23. Регистрация параметров остатка стержня за преградой производилась методом импульсного рентгенографирования двумя ортогонально расположенными рентгеноимпульсными аппаратами.

Как видно из приведенного анализа имеющихся работ, разработка трехмерного численного метода, учитывающего фрагментацию соударяющихся тел, является весьма актуальной задачей. В основном авторы приведенных работ рассматривали однослойные пластины и удар по нормали. Следует отметить, что для практических задач больший интерес представляют разнесенные преграды и удар под углом. Для численного решения этих задач необходим надежный и достаточно универсальный метод, позволяющий адекватно воспроизводить процессы разрушения и фрагментации, протекающие в твердых телах при высокоскоростном взаимодействии.

Учет фрагментации материала твердых тел при интенсивных динамических нагружениях позволяет использовать Лагранжев подход к задачам высокоскоростного удара для достаточно широкого ди-

апазона скоростей взаимодействия. Этот подход особенно удобен при рассмотрении многоконтактных взаимодействий сталкивающихся тел, особенно при решении трехмерных задач удара. Начальная гетерогенность структуры реальных материалов, влияющая на характер распределения физико-механических характеристик материала по объему рассматриваемого тела, является важным фактором, определяющим характер разрушения. Одним из способов учета этого факта является введение в уравнения механики деформируемого твердого тела случайного распределения начальных отклонений прочностных свойств от номинального значения, то есть моделирование, таким образом, начальных структурных особенностей материала, а именно наличие пор, включений, дислокаций и т. д.

В представленной работе в трехмерной Лагранжевой постановке рассматривается процесс высокоскоростного взаимодействия слоистых и разнесенных преград с длинными стержнями (отношение длины стержня к его диаметру равнялось 10). Задачи решаются для широкого диапазона скоростей с учетом дробления материала взаимодействующих тел, причем соударение происходит не только по нормали, но и под углом к поверхности преграды.

Для описания процессов деформирования и дробления твердых тел используется модель прочного сжимаемого идеально упругопластического тела. Основные соотношения, описывающие движение этой среды, базируются на законах сохранения массы, импульса и энергии, и замыкаются соотношениями Прандтля–Рейсса при условии текучести Мизеса [14–16]. Уравнение состояния берется в форме Тета и Ми–Грюнайзена [14]. Известно, что пластические деформации, давление и температура оказывают влияние на предел текучести и модуль сдвига, поэтому модель дополнялась соотношениями, апробированными в работе [17].

Для расчета упругопластических течений используется методика, реализованная на тетраэдрических ячейках и базирующаяся на совместном использовании метода Уилкинса [15, 16] для расчета внутренних точек тела и метода Джонсона [18, 19] для расчета контактных взаимодействий. Разбиение трехмерной области на тетраэдры происходит последовательно с помощью подпрограмм автоматического построения сетки.

В качестве критерия разрушения при интенсивных сдвиговых деформациях используется достижение эквивалентной пластической деформацией своего предельного значения [14, 20].

Начальные неоднородности структуры моделировались распределением предельной эквивалентной пластической деформации по ячейкам расчетной области с помощью модифицированного генератора случайных чисел, выдающего случайную величину, подчиняющуюся выбранному закону распределения. Плотности вероятности случайных величин брались в виде нормального гауссовского распределения со средним арифметическим,

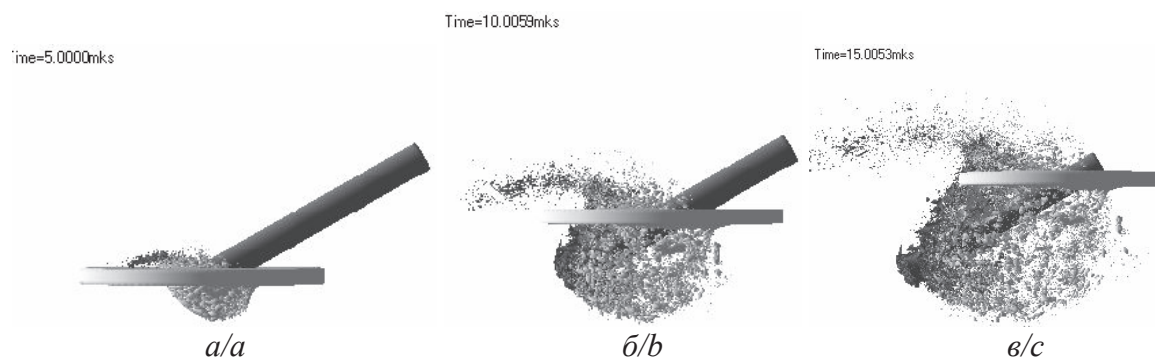


Рис. 1. Удар под углом 60 градусов (ударник: вольфрамовый сплав, радиус 0,2 см, длина 4 см, $v=2764$ м/с; преграда: сталь, радиус 1,6 см, толщина 0,2 см): а) 5; б) 10; в) 15 мкс

Fig. 1. Impact at an angle of 60 degrees (impactor: tungsten alloy, radius is 0,2 cm, length is 4 cm, $v=2764$ m/sec; barrier: steel, radius is 1,6 cm, thickness is 0,2 cm): a) 5; b) 10; c) 15 mks

равным табличному значению, и варьируемой дисперсией.

Используемые в современных работах по динамическому разрушению конструкций и материалов соотношения механики деформируемого твердого тела не учитывают вероятностного фактора в задаче дробления твердых тел, что может существенно исказить реальную картину ударного и взрывного разрушения рассматриваемых объектов. Последнее особенно проявляется при решении осесимметричных задач, где все точки по окружной координате рассчитываемого элемента исходно равноправны в силу используемых при численном моделировании стандартных уравнений механики сплошных сред. На практике, однако, имеется широкий ряд задач, где фрагментация является преимущественно вероятностным процессом, например, взрывное разрушение осесимметричных оболочек, где характер дробления заранее неизвестен, пробитие и разрушение тонких преград ударником по нормали к поверхности, так называемое «лепесткование», и т. д. Внесение случайного распределения начальных отклонений прочностных свойств от номинального значения в физико-механические характеристики тела приводит к тому, что в этих случаях процесс разрушения приобретает вероятностный характер, что более соответствует экспериментальным данным, используемым в данной работе. Наиболее полно идеология и методология вероятностного подхода к проблеме разрушения твердых тел приведена в [21].

Процесс соударения под углом цилиндрического ударника с плоским торцом с тонкой стальной пластиной показан на рис. 1.

На рис. 1 приведены отдельные моменты взаимодействия ($t=5$; $t=10$; $t=15$ мкс) ударника с преградой под углом 60 градусов от нормали к ее поверхности, полученные при численном моделировании процесса соударения. Картина соударения хорошо коррелирует с экспериментальными данными, приведенными на рис. 2. Наблюдается выброс материала с лицевой поверхности преграды и формирование своеобразного осколочного «пузыря» тыльной поверх-

ности. Часть материала с переднего торца ударника эродирует и вносит свой вклад в формирование осколочного поля системы «ударник–преграда».

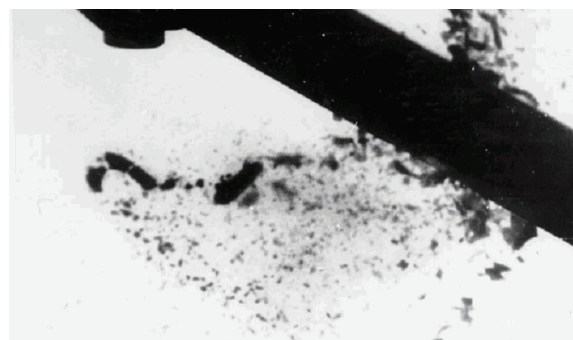


Рис. 2. Рентгенограмма пробития стального экрана толщиной 6 мм ударником из вольфрамового сплава диаметром 0,4 см и удлинением 10 см под углом 60 градусов при скорости 2764 м/с

Fig. 2. X-ray pattern of 6 mm steel screen breaking by tungsten alloy impactor with the diameter 0,4 cm and an elongation of 10 cm at an angle of 60 degrees at the rate of 2764 m/sec



Рис. 3. Удар под углом 60 градусов (ударник: вольфрамовый сплав, радиус 0,2 см, длина 4 см; преграда: сталь, радиус 1,6 см, толщина 0,2 см, $v=2764$ м/с)

Fig. 3. Impact at an angle of 60 degrees (impactor: tungsten alloy, radius is 0,2 cm, length is 4 cm; barrier: steel, radius is 1,6 cm, thickness is 0,2 cm, $v=2764$ m/sec)

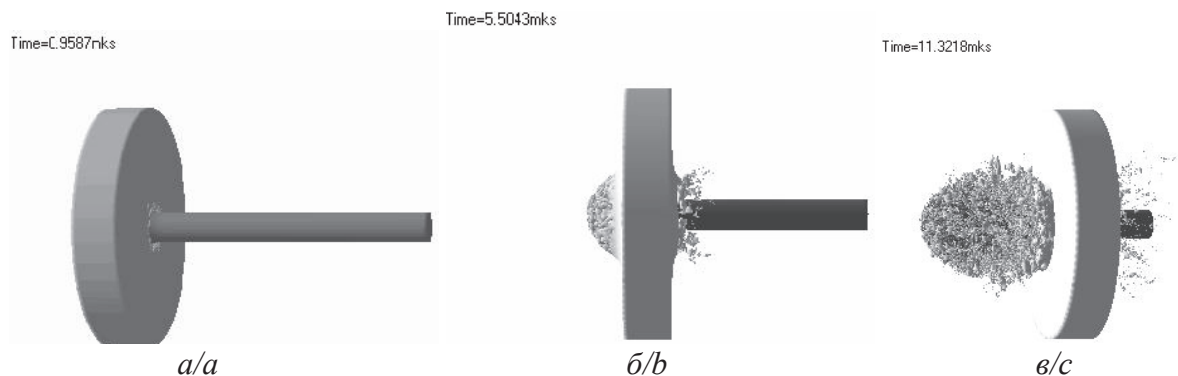


Рис. 4. Удар по нормали (ударник: вольфрамовый сплав, радиус 0,2 см, длина 4 см; преграда: сталь, радиус 1,6 см, толщина 0,2 см, $v=2732$ м/с): а) 1; б) 5,5; в) 11,3 мкс

Fig. 4. Normal impact (impactor: tungsten alloy, radius is 0,2 cm, length is 4 cm; barrier: steel, radius is 1,6 cm, thickness is 0,2 cm, $v=2732$ m/sec): а) 1; б) 5,5; в) 11,3 mks

Результаты эксперимента (рис. 2) качественно подтверждают картину взаимодействия ударника с преградой, приведенную на рис. 3. Количественная оценка расчетных и экспериментальных данных по остаточной длине стержня после пробития им преграды в рассмотренном случае была затруднена в силу дробления ударника в эксперименте на ряд кусков. Это произошло из-за наличия угла нутации, что не было заложено в проведенный расчет.

На рис. 4 приведены характерные особенности процесса соударения по нормали стержня со стальной пластиной – преградой. Здесь наблюдается выброс материала с лицевой поверхности и формирование осколочного потока за тыльной стороной пластины. Формирование потока фрагментов при осесимметричной постановке задачи об ударе по нормали возможно только при использовании трехмерного подхода и учете вероятностного характера дробления материала преграды и ударника.

Результаты численного моделирования процесса соударения стержня и преграды по нормали к последней для ряда моментов времени ($t=1$; $t=5,5$; $t=11,3$ мкс) приведены на рис. 4, 6. Эрозия материала с переднего торца ударника отчетливо видна на рис. 6.

На рис. 6 представлено двумерное сечение трехмерной картины взаимодействия стержня и преграды (рис. 4). Сравнение экспериментальных данных (рис. 5) с численными результатами (рис. 4, 6) позволяет сделать вывод о хорошем качественном совпадении полученных результатов, а также отображении в расчете характерных особенностей процесса осколкообразования из материалов стержня и преграды. Количественная оценка расчетных и экспериментальных данных по остаточной длине стержня после пробития им преграды в рассмотренном случае дала разницу порядка 2 % и по остаточной скорости – 6 %.

На рис. 7 показаны осколочные спектры для преграды и ударника. Картина разрушения преград и ударника характеризуется наличием оскол-

ков различных размеров с преобладанием самой мелкой фракции, что характерно для высокоскоростных соударений [22].

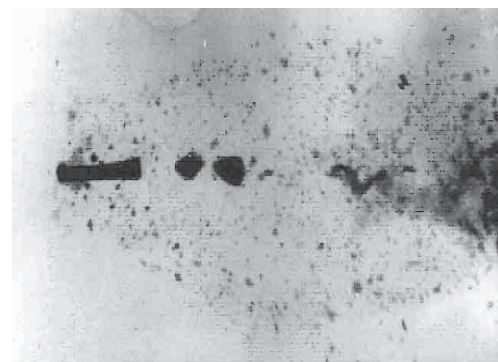


Рис. 5. Рентгенограмма пробития стальной пластины толщиной 6 мм ударником из вольфрамового сплава диаметром 4 мм и удлинением 10 при скорости 2732 м/с

Fig. 5. X-ray pattern of 6 mm steel plate breaking by tungsten alloy impactor with the diameter 4 mm and elongation 10 at the rate of 2732 m/sec

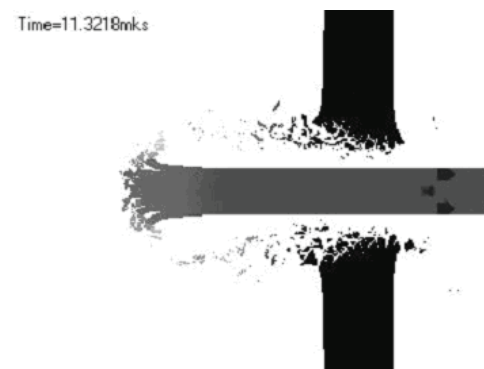


Рис. 6. Удар по нормали (ударник: вольфрамовый сплав, радиус 0,2 см, длина 4 см; преграда: сталь, радиус 1,6 см, толщина 0,6 см; $v=2732$ м/с)

Fig. 6. Normal impact (impactor: tungsten alloy, radius is 0,2 cm, length is 4 cm; barrier: steel, radius is 1,6 cm, thickness is 0,6 cm, $v=2732$ m/sec)

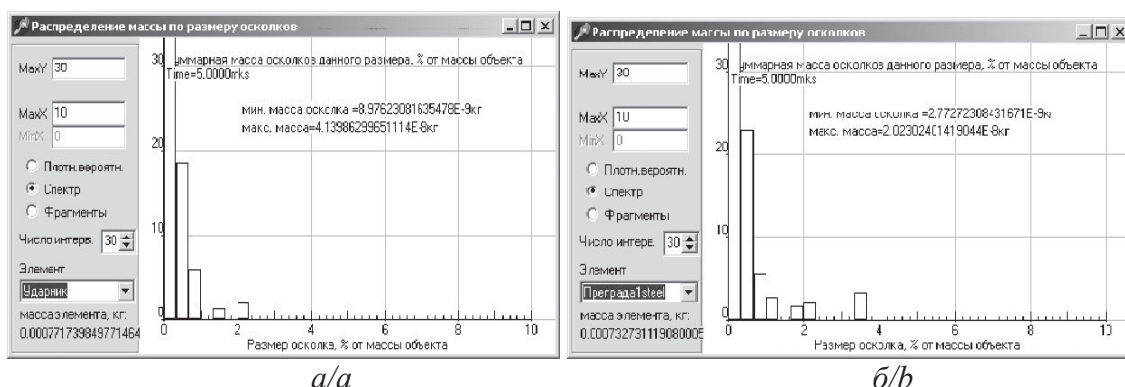


Рис. 7. Осколочный спектр: а) ударник; б) преграда

Fig. 7. Fission spectrum: a) impactor; b) barrier

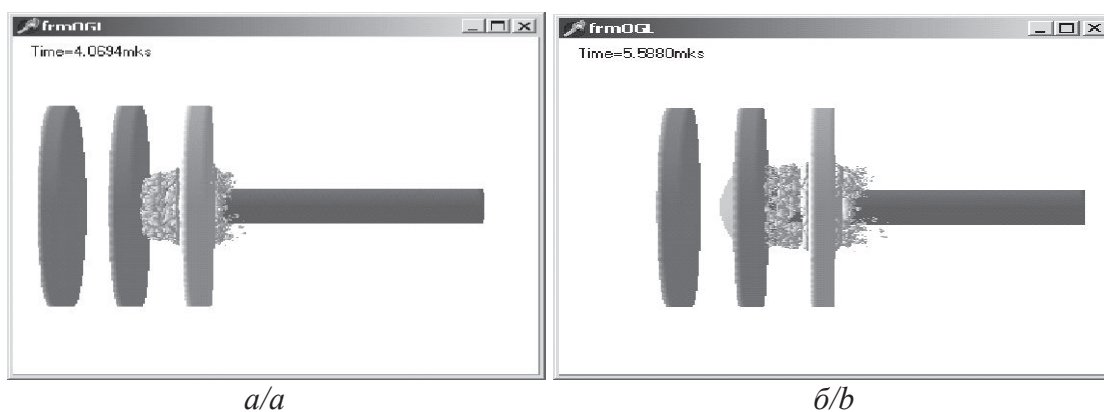


Рис. 8. Взаимодействие стержня с разнесенной преградой из трех пластин (ударник: радиус 0,5 см, длина 8 см; преграда: сталь Al-Ti, радиус 3 см, толщина 0,5 см, расстояние между пластинами 1 см, $v=5000$ м/с): а) 4; б) 5,6 мкс

Fig. 8. Interaction of a rod with a spaced barrier of three plates (impactor: radius is 0,5 cm, length is 8 cm; barrier: Al-Ti steel, radius is 3 cm, thickness is 0,5 cm, distance between plates is 1 cm, $v=5000$ m/sec)

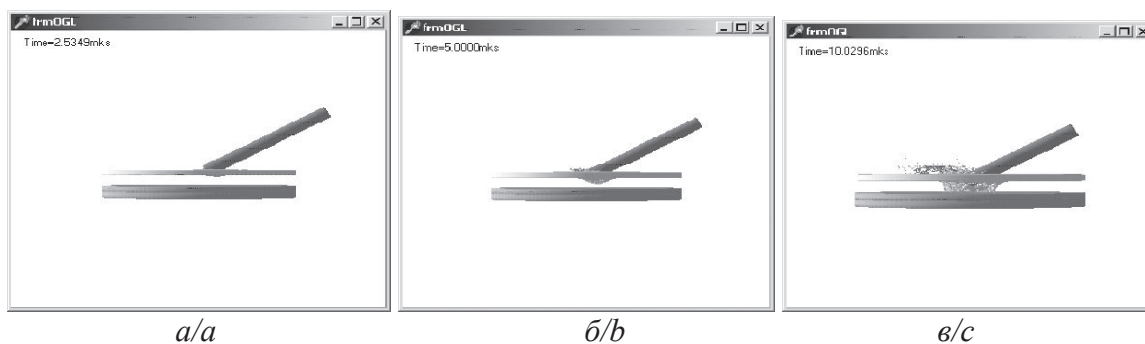


Рис. 9. Взаимодействие стержня с разнесено-слоистой преградой (ударник: радиус 0,3 см, длина 6 см; преграда: сталь Al+Ti, радиус 3 см, толщина 0,3 см, расстояние между пластинами 0,5 см, $v=2600$ м/с, угол соударения 60 град): а) 2,5 мкс, б) 5 мкс, в) 10 мкс

Fig. 9. Interaction of a rod with a layered-spaced barrier of three plates (impactor: radius is 0,3 cm, length is 6 cm; barrier: Al-Ti steel, radius is 3 cm, thickness is 0,3 cm, distance between plates is 0,5 cm, $v=2600$ m/sec, impact angle is 60 degrees)

Возможности предложенной методики иллюстрируют приведенные расчеты взаимодействия стержня с разнесенной преградой, состоящей из трех пластин (рис. 8), и взаимодействия стержня с разнесено-слоистой преградой (рис. 9). Проникновение разнесенной преграды сопровождается формированием выброса материала с лицевой стороны пер-

вой пластины и потока осколков с тыльной стороны. Следующая пластина подвергается воздействию сохранившейся части ударника и потока фрагментов от предыдущей пластины и разрушенной части ударника (рис. 8). Происходит торможение остатка ударника, и при соответствующем подборе пластин, расстояний между ними и началь-

ной скорости ударника возможно пробитие либо отсутствие перфорации системы пластин. Качественно процесс пробития системы разнесенных пластин во многом похож на пробитие одной пластины, но количественные характеристики существенно отличаются. Первый этап соударения стержня со слоисто-разнесенной пластиной хорошо коррелирует с результатами, приведенными на рис. 9. Дальнейшее взаимодействие со слоистой преградой определяется физико-механическими свойствами слоев, что приводит к изменению времени, необходимому для их пробития.

Выводы

Вероятностный подход и предложенная в работе численная методика в наиболее полной, с физической точки зрения, трехмерной постановке позволяют с достаточно высокой точностью воспроиз-

водить процессы пробития многослойных и разнесенных преград высокоскоростными стержневыми элементами. В расчетах полностью моделируются осколочные поля и учитывается взаимодействие осколков между собой и с элементами многослойной преграды, что чрезвычайно важно при расчетах по защите космических аппаратов, так как формирующиеся при ударе потоки высокоскоростных частиц могут пробить основной корпус аппарата и повредить оборудование. Поэтому необходимо оценить кинетическую энергию осколков и рассчитать процесс соударения их с основным корпусом. Предложенный подход позволяет рассчитать весь процесс взаимодействия ударника и преград с учетом формирования осколочных потоков и соударения последних с защищаемым объектом.

Работа выполнена при частичной поддержке грантов РФФИ 13-08-00296-а и 12-08-00641-а.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Jones N., Birch R.S. Low-velocity impact of pressurised pipelines // *International Journal of Impact Engineering*. – 2010. – V. 37. – № 2. – P. 207–219.
2. Full-scale impact tests on pipelines / A. Palmer, M. Touhey, S. Holder, M. Anderson, S. Booth // *International Journal of Impact Engineering*. – 2006. – V. 32. – № 8. – P. 1267–1283.
3. Герасимов А.В., Пашков С.В. Численное моделирование пробития слоистых преград // *Механика композиционных материалов и конструкций*. – 2013. – Т. 19. – № 1. – С. 49–61.
4. Gerasimov A.V., Pashkov S.V. Numerical simulation of the perforation of layered barriers // *Composites: Mechanics, Computations, and Applications. An International Journal*. – 2013. – V. 4. – № 2. – P. 97–111.
5. Chen X.W., Huang X.L., Liang G.J. Comparative analysis of perforation models of metallic plates by rigid sharp-nosed projectiles // *International Journal of Impact Engineering*. – 2011. – V. 38. – P. 613–621.
6. Experimental and numerical studies of double-nosed projectile impact on aluminum plates / M.A. Iqbal, S.H. Khan, R. Ansari, N.K. Gupta // *International Journal of Impact Engineering*. – 2013. – V. 54. – P. 232–245.
7. Influence of projectile shape and incidence angle on the ballistic limit and failure mechanism of thick steel plates / M.A. Iqbal, A. Diwakar, A. Rajput, N.K. Gupta // *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*. – 2012. – V. 62. – P. 40–53.
8. Ben-Dor G., Dubinsky A., Elperin T. About effect of layering on ballistic properties of metal shields against sharp-nosed rigid projectiles // *Engineering Fracture Mechanics*. – 2013. – V. 102. – P. 358–361.
9. Nezamabadi A.R., Vahedi K., Zohoor H. Development of a penetration model for an erosive long rod considering strength effects of colliding materials // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. P. C: Journal of Mechanical Engineering Science*. – 2011. – V. 225. – P. 965–973.
10. Perforation and penetration of aluminium target plates by armour piercing bullets / A. Manes, F. Serpellini, M. Pagani, M. Saponara, M. Giglio // *International Journal of Impact Engineering*. – 2014. – V. 69. – P. 39–54.
11. Jones N., Jeom K.P. Impact perforation of aluminium alloy plates // *International Journal of Impact Engineering*. – 2012. – V. 48. – P. 46–53.
12. Толкачев В.Ф. Разрушение комбинированных преград высокоскоростными стержневыми ударниками // *Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики: Матер. V Все-союзной науч. конф.* – Томск, 2006. – С. 312–313.
13. Экспериментальное и компьютерное моделирование бронепробиваемости компактными и удлиненными элементами / А.В. Герасимов, А.А. Коняев, С.Н. Кульков, В.Ф. Толкачев, Ю.Ф. Христенко // *Вестник Академии военных наук*. – 2008. – № 3. – С. 149–154.
14. Физика взрыва / под ред. К.П. Станюковича. – М.: Наука, 1975. – 704 с.
15. Уилкинс М.Л. Вычислительные методы в гидродинамике. – М.: Мир, 1967. – 263 с.
16. Wilkins M.L. Computer simulation of dynamic phenomena. – Berlin; Heidelberg; New-York: Springer, 1999. – 246 p.
17. Steinberg D.J., Cochran S.G., Guinan M.W. A constitutive model for metals applicable at high-strain rate // *J. Appl. Phys.* – 1980. – V. 51. – № 3. – P. 1496–1504.
18. Johnson G.R., Colby D.D., Vavrick D.J. Tree-dimensional computer code for dynamic response of solids to intense impulsive loads // *Int. J. Numer. Methods Engng.* – 1979. – V. 14. – № 12. – P. 1865–1871.
19. Johnson G.R. Dynamic analysis of explosive-metal interaction in three dimensions // *Trans. ASME. J. of Appl. Mech.* – 1981. – V. 48. – № 1. – P. 30–34.
20. Нахождение баллистического предела при соударении с многослойными мишенями / К.Н. Крейнхаген, М.Х. Вагнер, Дж. Пьечочки, Р.Л. Бюрк // *Ракетная техника и космонавтика*. – 1970. – Т. 8. – № 12. – С. 42–47.
21. Теоретические и экспериментальные исследования высокоскоростного взаимодействия тел / под ред. А.В. Герасимова. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 2007. – 572 с.
22. Высокоскоростные ударные явления / под ред. Р. Кинслоу. – М.: Мир, 1973. – 536 с.

Поступила 20.04.2014 г.

UDC 539.3

NUMERICAL SIMULATION OF LONG RODS COLLISION WITH LAYERED-SPACED BARRIERS

Alexander V. Gerasimov,

Dr. Sc., National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Avenue,
Tomsk, 634050, Russia. E-mail: ger@mail.tomsknet.ru

Relevance of the research is caused by the need to protect space technology against man-made debris.

The main aim of the study is to justify the application of three-dimensional numerical method based on the Lagrangian approach in describing the behavior of a continuum and a probabilistic approach in solid body fragmentation under impact loading relative to the problem of protecting space and ground facilities by combined barriers when interacting with elongated strikers-rods.

The methods used in the study: A computational experiment involving experimental data to verify the numerical results.

The results. The probabilistic approach and the proposed numerical technique allow, from physical point of view, reproducing with sufficient accuracy the processes of penetration and multilayer barriers spaced by high-speed core elements in more complete three-dimensional formulation. The introduction of random distribution of strength behavior initial displacement form nominal value into a body physical and mechanical characteristics results in destruction probabilistic nature in this case. This corresponds to the experimental data. The efficiency of spaced and layered-spaced barriers, currently widely used as protecting devices, is related to instability, plastic deformation and rod destruction besides hydrodynamic and strength resistance. The totality of the processes results in nutation angles occurrence, deviation of velocity vector and rod residue and fragments as well as in decrease in depth of penetration into layered-spaced construction in comparison with an inflexible rod. In calculations the author simulates shrapnel fields and takes into account fragments interaction and their interaction with the elements of a multi-layer barrier. The results obtained allow optimizing the protection of objects of mass geometrical parameters. An important application of the proposed approach is to study the deformation, fracture and ways to protect pipelines from the explosion and impact.

Key words:

Numerical modeling, experiment, high-speed impactor, probability, fragmentation, space debris, pipeline, protection.

The research was partially supported by RFBR grants 13–08–00296-a and 12–08–00641-a.

REFERENCE

1. Jones N., Birch R.S. Low-velocity impact of pressurised pipelines. *International Journal of Impact Engineering*, 2010, vol. 37, no. 2, pp. 207–219.
2. Palmer A., Touhey M., Holder S., Anderson M., Booth S. Full-scale impact tests on pipelines. *International Journal of Impact Engineering*, 2006, vol. 32, no. 8, pp. 1267–1283.
3. Gerasimov A.V., Pashkov S.V. Chislennoe modelirovanie probitiya sloistykh pregrad [Numerical modeling of the layered barriers penetration]. *Mekhanika kompozitsionnykh materialov i konstruktsiy*, 2013, vol. 19, no. 1, pp. 49–61.
4. Gerasimov A.V., Pashkov S.V. Numerical simulation of the perforation of layered barriers. *Composites: Mechanics, Computations, and Applications. An International Journal*, 2013, vol. 4, no. 2, pp. 97–111.
5. Chen X.W., Huang X.L., Liang G.J. Comparative analysis of perforation models of metallic plates by rigid sharp-nosed projectiles. *International Journal of Impact Engineering*, 2011, vol. 38, pp. 613–621.
6. Iqbal M.A., Khan S.H., Ansari R., Gupta N.K. Experimental and numerical studies of double-nosed projectile impact on aluminum plates. *International Journal of Impact Engineering*, 2013, vol. 54, pp. 232–245.
7. Iqbal M.A., Diwakar A., Rajput A., Gupta N.K. Influence of projectile shape and incidence angle on the ballistic limit and failure mechanism of thick steel plates. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2012, vol. 62, pp. 40–53.
8. Ben-Dor G., Dubinsky A., Elperin T. About effect of layering on ballistic properties of metal shields against sharp-nosed rigid projectiles. *Engineering Fracture Mechanics*, 2013, vol. 102, pp. 358–361.
9. Nezamabadi A.R., Vahedi K., Zohoor H. Development of a penetration model for an erosive long rod considering strength effects of colliding materials. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 2011, vol. 225, pp. 965–973.
10. Manes A., Serpellini F., Pagani M., Saponara M., Giglio M. Perforation and penetration of aluminium target plates by armour piercing bullets. *International Journal of Impact Engineering*, 2014, vol. 69, pp. 39–54.
11. Jones N., Jeon K.P. Impact perforation of aluminium alloy plates. *International Journal of Impact Engineering*, 2012, vol. 48, pp. 46–53.
12. Tolkachev V.F. Razrushenie kombinirovannykh pregrad vysokoskorostnymi sterzhnevymi udarnikami [Destruction of combine barriers by high-speed rod impactors]. *Fundamentalnye i prikladnye problemy sovremennoy mekhaniki: Materialy V Vsesoyuznoy nauchnoy konferentsii* [Proc. V All-Union scientific conference. Fundamental and applied problems of modern mechanics]. Tomsk, Tomsk University Press, 2006. pp. 312–313.
13. Gerasimov A.V., Konyaev A.A., Kulikov S.N., Tolkachev V.F., Khristenko Yu.F. Eksperimentalnoe i kompyuternoe modelirovaniye broneprobivaemosti kompaktnymi i udlinennymi elementami [Experimental and computer simulation of armor penetration by compact and long elements]. *Vestnik Akademii voennykh nauk*, 2008, no. 3 (24), pp. 149–154.
14. *Fizika vzryva* [Physics of explosion]. Ed. by K.P. Stanyukovich. Moscow, Nauka Publ., 1975. 704 p.
15. Wilkins M.L. Calculation of elastic-plastic flow. *Methods in Computational Physics*. Ed. B. Adler. NY, Academic Press, 1964. Vol. 3, 263 p.
16. Wilkins M.L. *Computer simulation of dynamic phenomena*. Berlin; Heidelberg; New-York, Springer, 1999. 246 p.
17. Steinberg D.J., Cochran S.G., Guinan M.W. A constitutive model for metals applicable at high-strain rate. *J. Appl. Phys.*, 1980, vol. 51, no. 3, pp. 1496–1504.
18. Johnson G.R., Colby D.D., Vavrick D.J. Tree-dimensional computer code for dynamic response of solids to intense impulsive loads. *Int. J. Numer. Methods Engng.*, 1979, vol. 14, no. 12, pp. 1865–1871.
19. Johnson G.R. Dynamic analysis of explosive-metal interaction in three dimensions. *Trans. ASME. J. of Appl. Mech.*, 1981, vol. 48, no. 1, pp. 30–34.
20. Kreinhagen K.N., Vagner M.H., Pechotski J., Bork R.L. A determination of a ballistic limit at impact with structural targets. *AI-AA J.*, 1970, vol. 8, pp. 42–47.
21. *Teoreticheskie i eksperimentalnye issledovaniya vysokoskorostnogo vzaimodeystviya tel* [Theoretical and experimental researches of high-speed interaction of bodies]. Ed. by A.V. Gerasimov. Tomsk, Tomsk University Press, 2007. 572 p.
22. *High-Velocity Impact Phenomena*. Ed. by R. Kinslow. New York; London, Academic Press, 1970. 536 p.

Received: 20 April 2014.