

УДК 539.3

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЕСТЕСТВЕННОГО ДРОБЛЕНИЯ ТВЕРДЫХ ТЕЛ ПРИ УДАРНЫХ И ВЗРЫВНЫХ НАГРУЖЕНИЯХ

© 2005 г. А. В. Герасимов, С. В. Пашков

*Научно-исследовательский институт прикладной математики
и механики при Томском государственном университете*

Поступила в редакцию 28.01.2004

В статье рассматривается проблема численного моделирования ударного и взрывного дробления твердых тел с учетом вероятностного характера распределения физико-механических характеристик материала. Приведены результаты математического моделирования фрагментации замкнутой толстостенной оболочки бегущей детонационной волной и пробития тонкой преграды деформируемыми ударниками при нормальном ударе и при ударе под углом. Рассматриваются ударники в виде толстостенных оболочек с твердым наполнителем и без наполнителя. Задачи решаются в трехмерной постановке. Приведены результаты тестового расчета разрушения кольца расширяющейся под действием продуктов детонации оболочкой. Показано влияние вероятностного характера распределения физико-механических характеристик материала на процессы разрушения рассмотренных в работе конструкций.

Исследование процессов разрушения и фрагментации твердых деформируемых тел при взрывном и ударном нагружении имеет большое значение для прогнозирования характера разрушения конструкций при природных и техногенных катастрофах и авариях, обработке материалов взрывом, для оборонных исследований и т.д. При разработке систем, предназначенных для эксплуатации в условиях импульсного нагружения, необходимо знать текущий уровень поврежденности материала конструкции, а в случае, когда поврежденность превысила критическое значение, – количество образующихся при разрушении фрагментов, их форму, размеры, скорости и распределение по массе.

В ряде задач характер разрушения предопределен условиями нагружения и формой взаимодействующих тел (например, откол, разрушение тел с подрезами, выбивание пробки ударником и т.д.) и его можно предсказать заранее достаточно точно. В то же время на картину фрагментации твердых тел при действии высокоинтенсивного динамического нагружения существенное влияние оказывает наличие исходных поврежденностей, обусловленных дефектами структуры исходного материала. Имеется ряд задач, где фрагментация является существенно вероятностным процессом. Это, например, задачи взрывного дробления осесимметричных оболочек, где характер фрагментации, как правило, заранее неизвестен и требуется обязательный учет случайного распределения начальных дефектов структуры материала. Влияние неоднородности структуры проявляется также в задачах ударного и взрывного нагружения элементов конструкций, например, пробития преград высокоскоростными ударниками.

Для того чтобы численно моделируемый процесс фрагментации отражал реальную картину по-

ведения разрушаемых тел, полученную в экспериментах, необходимо внести определенные возмущения в физико-механические характеристики тела (моделирование начальных дефектных структур), причем представляет интерес случайное распределение начальных отклонений прочностных свойств от номинального значения. Следовательно, при численном моделировании процессов разрушения необходимо учитывать случайный характер распределения начальных физико-механических характеристик, вызванный дефектами структуры материала. В этом случае процесс разрушения приобретает вероятностный характер, что соответствует теоретическим представлениям и экспериментальным данным.

Следует отметить, что работы, посвященные дроблению оболочек продуктами детонации ВВ, в основном носят экспериментальный характер или посвящены построению статистических моделей распределения фрагментов, т.е. изучению осколочных спектров. Экспериментальному исследованию процессов взрывного разрушения цилиндрических оболочек посвящено большое количество работ отечественных и зарубежных авторов (см., например, [1–4]).

Численный метод, используемый для расчета фрагментации твердых тел, должен учитывать распределение начальных неоднородностей по объему тела, описывать накопление поврежденности в процессе деформирования, возникновение, рост и слияние трещин. Особенности подобных задач требуют использования лагранжевого подхода к описанию движения разрушаемой среды, что значительно упрощает отслеживание свободных и контактных границ.

Разрушение упругопластических цилиндров при подрыве зарядов взрывчатых веществ (ВВ) исследовалось в ряде работ отечественных и зарубежных исследователей [5–9]. В [8, 9] рассматривалась двумерная осесимметричная постановка задачи, которая позволяет исследовать расширение и откольное разрушение оболочек в идеализированном случае. Фрагментации цилиндра при решении задачи в плоской двумерной постановке посвящены работы [10, 11].

Расширение оболочки под действием продуктов детонации в трехмерной постановке исследовалось в [12]. Разрушение упругопластических цилиндров при мгновенном подрыве зарядов ВВ в случае заданного и естественного дробления рассматривалось в работе [13]. Задачи в [13] решались в трехмерной постановке, так как такой подход позволяет исследовать процессы динамического нагружения цилиндров более полно по сравнению с одномерным и двумерным подходами. Заданное дробление реализовывалось с использованием линий локального ослабления прочностных характеристик материала вдоль образующих и окружности цилиндров, естественное дробление – с использованием вероятностного подхода к описанию начального распределения физико-механических характеристик материала оболочек.

В настоящей работе в трехмерной постановке исследуется естественное дробление твердых тел при ударном и взрывном нагружении. Используется математическая модель, описывающая деформирование и разрушение материалов при упругопластическом течении под действием ударных и взрывных нагрузок [2, 14]. Математическая постановка включает в себя уравнения: неразрывности, движения, энергии, которые замыкаются соотношениями Прандтля–Рейсса при условии текучести Мизеса [14]. Уравнение состояния взято в форме, приведенной в [2].

В качестве критерия разрушения при интенсивных сдвиговых деформациях в данном случае используется достижение эквивалентной пластической деформации или удельной величины работы пластических деформаций своих предельных значений [7, 15].

Продукты детонации (ПД) рассматривали как невязкий нетеплопроводный газ. Система уравнений, описывающая движение газа, получается аналогично уравнениям для сжимаемого прочного тела из общих законов сохранения массы, количества движения, энергии и замыкается уравнением состояния, конкретизирующим рассчитываемый газ. В нашем случае использовалось уравнение состояния в виде политропы Ландау–Станюковича [2]. Система включает: уравнение неразрывности, уравнения движения, уравнение энергии. При моделировании процесса детонации заряда ВВ, при лагранжевом способе описания движения среды,

применялся подход, предложенный в работе [16]. При сжатии ВВ в счетной ячейке до критического значения уравнение состояния, описывающее поведение твердого тела, заменялось уравнением состояния продуктов детонации.

Для расчета упругопластических и газодинамических течений используется методика, реализованная на тетраэдрических ячейках и базирующаяся на совместном использовании метода Уилкинса [7, 14] для расчета внутренних точек тела и метода Джонсона [17, 18] для расчета контактных взаимодействий. Разбиение трехмерной области на тетраэдры происходит последовательно с помощью подпрограмм автоматического построения сетки. Естественная фрагментация толстостенной упругопластической оболочки и преграды рассчитывается с помощью введения вероятностного механизма распределения начальных дефектов структуры материала для описания отрывных и сдвиговых трещин. Наличие поврежденностей в материале моделируется варьированием предельного значения эквивалентной пластической деформации, которое подчинялось нормальному закону распределения со средним арифметическим, равным табличному значению и варьированной дисперсией. Распределение предельного значения эквивалентной пластической деформации по ячейкам оболочки осуществляется с помощью модифицированного генератора случайных чисел, выдающего случайную величину, подчиняющуюся выбранному закону распределения. Плотности вероятности случайных величин брались также в виде вейбулловского распределения и в виде экспоненциального закона распределения со средним арифметическим, равным табличному значению, и варьированной дисперсией. Было показано, что на характер фрагментации влияет не столько форма закона распределения, сколько его дисперсия.

В качестве тестового расчета было проведено численное моделирование задачи о разрушении кольца, одетого на металлическую трубку, заполненную ВВ [19]. Подобные эксперименты называются “exploding cylinder tests” [20] и позволяют снизить влияние неизбежных нарушений симметрии в геометрических параметрах и параметрах нагружения.

На рис. 1 представлена схема опыта по взрывному расширению цилиндра [19]. Дадим кратко ее описание. Медная трубка длиной 20 см заполнена ВВ. Внутренний диаметр трубки – 1.150 см, внешний – 1.698 см. В качестве ВВ использовался тротил. На середину трубки надето кольцо с внутренним диаметром, равным диаметру трубки, и внешним диаметром, равным 2.5 см. Высота кольца составляла 1.0 см. Расчетная сетка, используемая нами, составляла около 500 тысяч тетраэдрических ячеек. Для описания разрушения использовался метод раздвоения по узлам – при выполнении в окрестности узла критерия разрушения (в каче-



Рис. 1. Схема эксперимента.

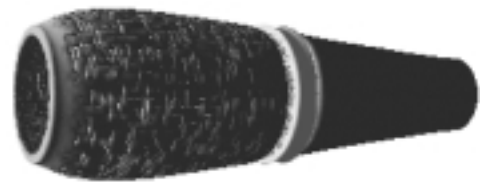


Рис. 2. Расширение оболочки кольца. Время $t = 30$ мкс.

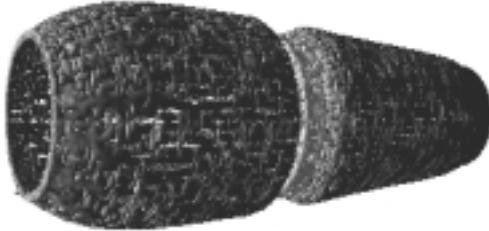


Рис. 3. Расширение оболочки кольца. Время $t = 45$ мкс.



Рис. 4. Разделение кольца на осколки.

стве которого был принят критерий по эквивалентной пластической деформации) происходит расщепление узлов и образование поверхности разрушения.

В начальный момент времени происходит срабатывание детонатора на одном из торцов трубки и детонационная волна начинает распространяться вдоль оси медной оболочки. В момент, когда взрывная волна доходит до середины оболочки, где расположено кольцо, характер процесса начинает меняться. Кольцо начинает играть роль дополнительного ребра жесткости и тормозит расширение оболочки, происходящее под действием давления продуктов детонации. Одновременно с этим начинается разгон самого кольца. Эволюция оболочки и кольца в процессе расширения представлена на рис. 2, 3 (продукты детонации не показаны). Схема эксперимента обеспечивает уменьшение влияния различных геометрических неоднородностей и особенностей сборки заряда ВВ, поэтому кольцо имеет достаточно равномерную радиальную скорость по всей окружности. В связи с тем, что скорость деформации

практически одинакова для всех точек кольца, основную роль в процессе зарождения трещин начинают играть начальные неоднородности.

Предельное значение эквивалентной пластической деформации распределялось по ячейкам расчетной области по нормальному закону распределения с дисперсией десятипроцентного отклонения. Распределение осуществлялось с помощью модифицированного генератора случайных чисел, выдающего величину, подчиняющуюся указанному закону распределения.

Внесение начальных неоднородностей в физико-механические свойства материала приводит к более раннему срабатыванию критерия разрушения на дефектах структуры и последующей разгрузке материала на образовавшейся при этом поверхности разрушения. По мере расширения кольца можно наблюдать локализацию деформаций в вершинах радиальных трещин, образовавшихся на начальных неоднородностях, и формирование достаточно крупных осколков (рис. 4).



Рис. 5. "Осколочный спектр".

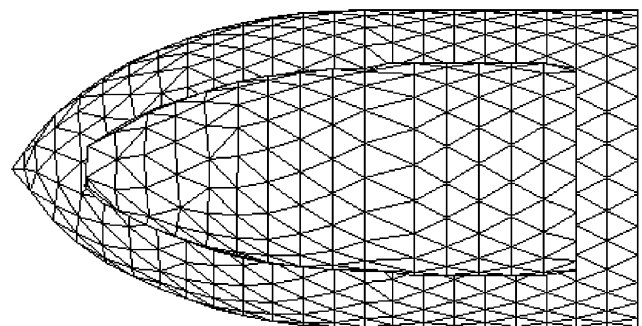


Рис. 6. Исходная конфигурация и расчетная сетка для замкнутой оболочки.

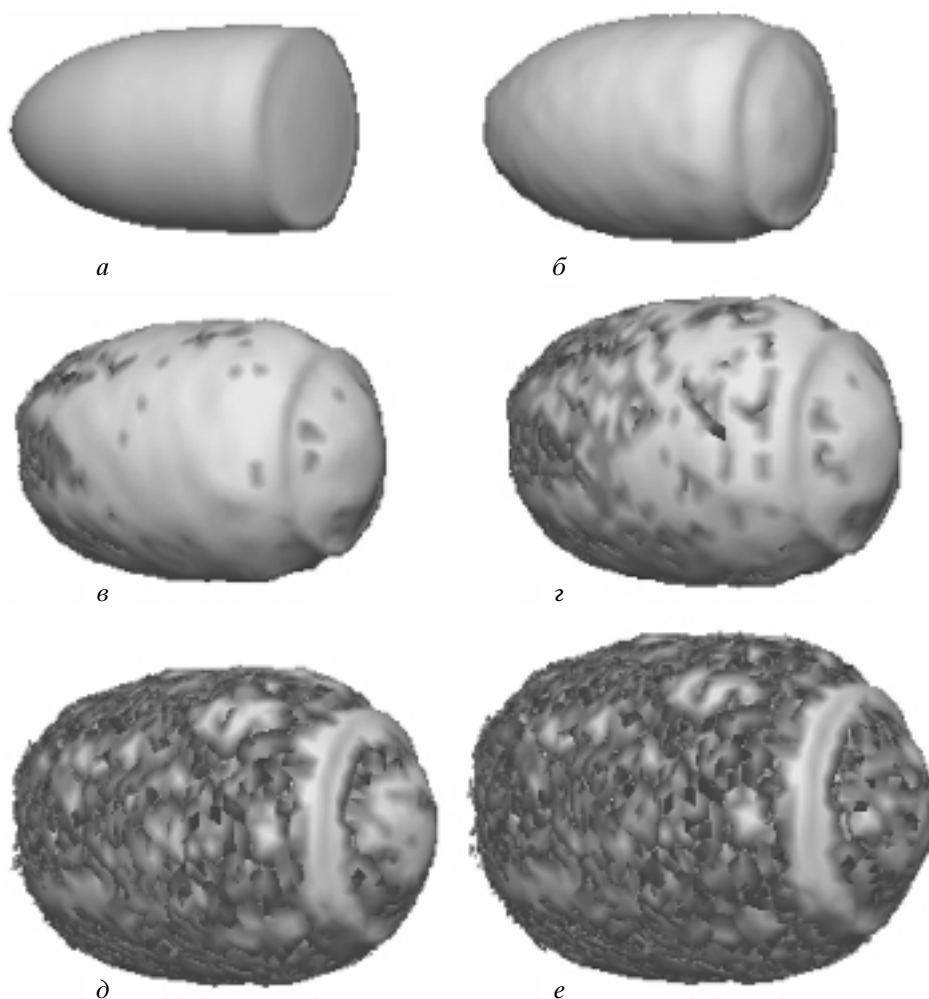


Рис. 7. Конфигурации оболочки для моментов времени $t = 10$ мкс (*a*), 25 мкс (*б*), 45 мкс (*в*), 50 мкс (*г*), 65 мкс (*д*), 75 мкс (*е*).

На “осколочном” спектре в координатах “масса осколка–номер осколка” (рис. 5) можно наблюдать 21 относительно крупный осколок, что вполне удовлетворительно согласуется с экспериментальными данными [19]. На графике виден характерный излом кривой между крупными осколками, образованными радиальными трещинами, и более мелкими, образованными в результате взаимодействия трещин. Несмотря на то, что использование метода раздвоения по узлам увеличивает число осколков мелкой фракции, описанный подход вполне может быть применен для предсказания числа крупных фрагментов, а также для таких определений поля скоростей осколков. Причем не только для простых элементов, как кольцо, но и для более сложных объектов, в том числе замкнутых оболочек.

Далее в работе представлены результаты численного моделирования в 3D-постановке задач дробления толстостенной упругопластической за-

мкнутой оболочки под действием скользящей детонационной волны и пробития преграды ударником с заполнителем и без заполнителя при случайном характере распределения начальных отклонений прочностных свойств от номинального значения, т.е. при введении в численную схему вероятностного механизма распределения начальных дефектов структуры материала. Полученные результаты сравниваются с результатами, полученными для задач с аналогичными параметрами, но с постоянными по объему преграды и ударника физико-механическими характеристиками материала.

Расчетная схема для задачи естественного дробления замкнутой толстостенной оболочки вращения с днищем и оживальной носовой частью приведена на рис. 6.

Для численных экспериментов по естественному дроблению использовались медные оболочки со следующими характеристиками: начальная плот-

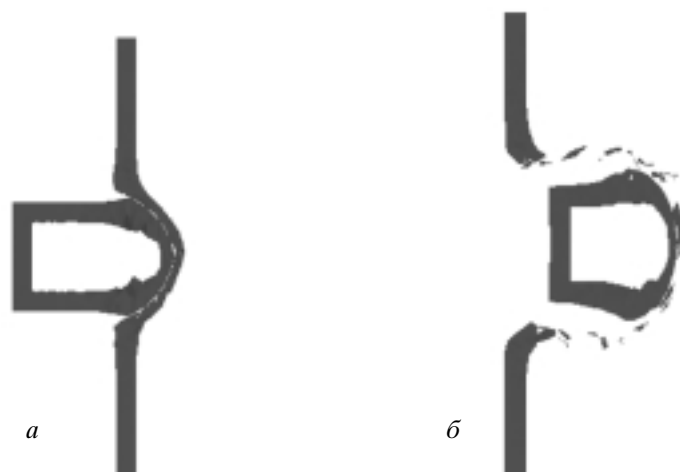


Рис. 8. Пробитие преграды деформируемой оболочкой. Конфигурации оболочки и преграды для моментов времени $t = 50$ мкс (*a*) и $t = 120$ мкс (*б*).



Рис. 9. Пробитие преграды оболочкой по нормали к поверхности ($t = 80$ мкс): *a* – расчет с постоянными характеристиками материала, *б* – вариант с учетом вероятностного характера распределения физико-механических характеристик материала.

ность материала оболочки равнялась 8.9 г/см^3 , модуль сдвига – 46 ГПа , предел текучести – 0.2 ГПа . Взрывчатое вещество – тротил со следующими параметрами: начальная плотность равнялась 1.62 г/см^3 , скорость детонации – 6940 м/с . Общая длина оболочки равнялась 12 см , длина цилиндрической части – 5.3 см . Внешний радиус цилиндрической части равнялся 3 см , внутренний радиус – 2 см . Толщина днища равнялась 1 см .

Процесс расширения замкнутой оболочки, разрушения и фрагментации для моментов времени $t = 10, 25, 45, 50, 65$ и 75 мкс проиллюстрирован на рис. 7. При $t = 75$ мкс (рис. 7e) дробление оболочки в основном завершено, и происходит процесс разлета осколков. Процесс дробления носит выраженный вероятностный характер формирования осколков, что отчетливо прослеживается на внешней поверхности оболочки, где наблюдаются осколки различных размеров.

В работе также приводятся результаты расчетов пробития тонких преград замкнутыми медными оболочками без наполнителя. Физико-механи-

ческие характеристики материала преграды и оболочки аналогичны приведенным выше.

Характерные особенности процесса пробития тонкой преграды деформируемой оболочкой без наполнителя приведены на рис. 8. Результаты расчетов приведены для плоскости, проходящей через ось симметрии, для двух моментов времени. В данном случае удар происходит по нормали к внешней поверхности преграды, т.е. в начальный момент времени задача является осесимметричной. Скорость соударения – 1250 м/с . Толщина медной преграды – 1 см , радиус – 12 см .

Далее рассматривались еще два варианта соударения оболочек без наполнителя с преградой. В первом случае удар происходит по нормали к внешней поверхности преграды. Во втором случае продольная ось оболочки отклонена на угол 30° к нормали, т.е. задача исходно трехмерная. Скорость соударения – 1200 м/с . Толщина медной преграды – 1 см , радиус – 12 см . Параметры оболочки использовались те же: внешний радиус цилиндрической части равнялся 3 см , внутренний радиус – 2 см , толщина днища равнялась 1 см .



Рис. 10. Пробитие преграды оболочкой под углом к поверхности ($t = 80$ мкс): *a* – расчет с постоянными характеристиками материала, *б* – вариант с учетом вероятностного характера распределения физико-механических характеристик материала.

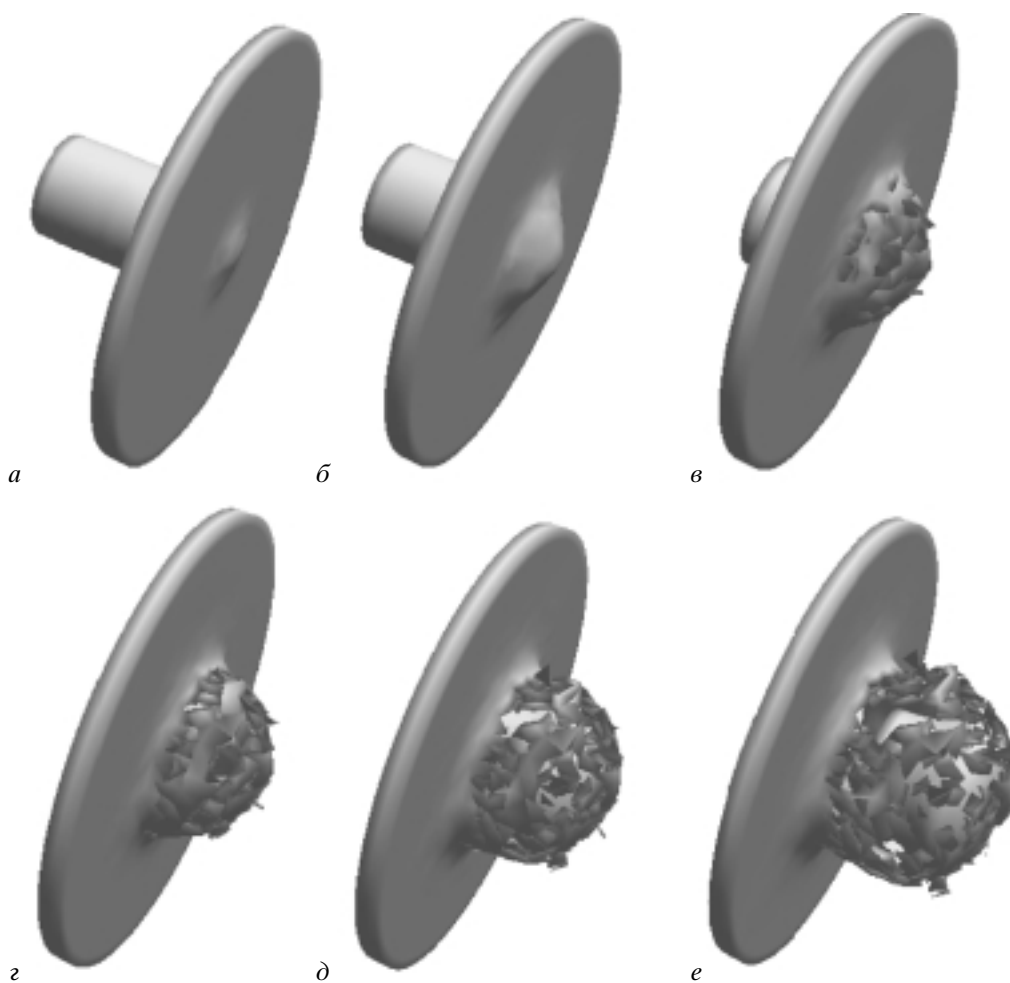


Рис. 11. Этапы пробития тонкой преграды оболочкой с наполнителем: в моменты времени $t = 20$ мкс (*a*), 40 мкс (*б*), 62 мкс (*в*), 80 мкс (*г*), 100 мкс (*д*), 127 мкс (*е*).

Для варианта расчета без учета вероятностного характера распределения физико-механических характеристик материала (рис. 9*a*) разрушение носит симметричный относительно оси вращения характер. Это обусловлено инвариантностью напряженно-деформированного состояния относитель-

но поворота вокруг оси симметрии, что в свою очередь приводит к одновременному разрушению материала, лежащего на одной окружности. В силу вероятностного характера разрушения преграды в моменты времени $t > 0$ задача перестает быть осесимметричной и становится простран-

венной для варианта расчета с учетом вероятностного характера распределения физико-механических характеристик материала (рис. 9б). В этом случае можно отметить, что появляются осколки, имеющие различную форму и размеры относительно первоначальной оси симметрии взаимодействующих преграды и ударника.

Во втором варианте соударения (продольная ось оболочки отклонена на 30° от нормали к преграде, рис. 10а, б) превалирующую роль играет начальная асимметрия процесса взаимодействия ударника и преграды, и выделить однозначно разрушения, обусловленные вероятностным характером распределения физико-механических характеристик материала, затруднительно. Но несомненно, что и здесь имеется влияние неоднородности физико-механических характеристик по объему ударника и преграды на процесс разрушения.

Развитие во времени процесса взаимодействия тонкой преграды со стальной оболочкой оживальной формы, заполненной зарядом взрывчатого вещества (ВВ), приведено для ряда моментов времени на рис. 11. В силу вероятностного характера разрушения преграды в моменты времени $t > 0$ задача перестает быть осесимметричной и становится пространственной. Это отчетливо видно на рисунках, где появляются тыльные разрушения преграды и формируется осколочное поле. Можно отметить в этом случае, что осколки имеют различную форму и размеры относительно первоначальной оси симметрии взаимодействующих преграды и ударника. Подобный характер осколкообразования более соответствует реальным процессам пробития преград, чем результаты работ, рассматривающих процесс пробития без учета вероятностного характера дробления реальных тел. Отклонение процесса пробития преграды от осевой симметрии ярко проявляется в характере деформирования и разрушения оболочки и на рис. 8. Деформированная в ходе взаимодействия с преградой медная оболочка уже не является идеально осесимметричной, по крайней мере в области ее оживальной части.

Следует отметить, что наиболее наглядно неосесимметричный характер дробления виден на рис. 11, где процесс пробития преграды представлен в пространственном виде.

ВЫВОДЫ

Полученные результаты показывают возможность предложенного вероятностного подхода и численной методики моделировать процессы естественного дробления элементов машиностроительных конструкций при интенсивных динамических нагружениях. Это подтверждается представленными в работе результатами решения трехмерных задач естественного дробления замк-

нутых оживальных оболочек бегущей детонационной волной, а также задач пробития тонкостенных преград деформируемыми оболочками без наполнителя и с наполнителем. Созданная методика решения задач фрагментации позволяет в наиболее полной, с физической точки зрения, трехмерной постановке адекватно воспроизводить процессы дробления твердых тел при действии взрывных и ударных нагрузок.

Работа выполнена при поддержке грантом Президента Российской Федерации № МК-1022.2003.08.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Райнхарт Д., Пирсон Д. // Поведение материалов при импульсных нагрузках. М.: Изд-во иностр. лит., 1958.
2. Баум А.Ф., Орленко Л.П., Станюкович К.П., Чельшиев В.П., Шехтер Б.И. Физика взрыва. М.: Наука, 1975.
3. Грязнов Е.Ф., Стаценко Т.Г., Хахалин С.В., Одинцов В.А. // Тр. МВТУ. 1983. № 399. С. 28.
4. Одинцов В.А. // Изв. АН. МТТ. 1992. № 5. С. 48.
5. Левитан Ю.Л., Моисеенко Б.Д. Препринт № 5. М.: ИПМ АН СССР, 1990.
6. Костин В.В., Резцов А.С., Сугак С.Т., Форттов В.Е. Препринт № 25. Минск: Ин-т тепло- и массообмена АН БССР, 1990.
7. Уилкинс М.Л. Вычислительные методы в гидродинамике. М.: Мир, 1967. С. 212.
8. Герасимов А.В. // ЖМТФ. 1996. Т. 37. № 3. С. 151.
9. Герасимов А.В. // Проблемы прочности. 1997. № 4. С. 44.
10. Герасимов А.В., Паишков С.В. // Вычислительные технологии. 2001. № 6. С. 118.
11. Герасимов А.В., Паишков С.В. // Хим. физика. 2002. Т. 21. № 9. С. 34.
12. Johnson G.R. // Trans. ASME. J. Appl. Mech. 1981. V. 48. P. 30.
13. Герасимов А.В., Михайлов В.Н., Паишков С.В. // Тр. Междунар. конф. "V Харитоновские тематические научные чтения". Саров, 2003. С. 78.
14. Wilkins M.L. Computer simulation of dynamic phenomena. Berlin-Heidelberg-New-York: Springer, 1999.
15. Крейнхаген К.Н., Вагнер М.Х., Пьечоцки Дж.Дж., Бьорк Р.Л. // Ракетная техника и космонавтика. 1970. Т. 8. № 12. С. 42.
16. Гольдин В.Я., Калиткин Н.Н., Левитан Ю.Л., Рождественский Б.Л. // Журн. вычислит. Математики и мат. физики. 1972. № 12. С. 1606.
17. Johnson G.R., Colby D.D., Vavrick D.J. // Int. J. Numer. Methods Engng. 1979. V. 14. P. 1865.
18. Johnson G.R. // Trans. ASME. J. Appl. Mech. 1981. V. 48. P. 30.
19. Diep Q.B., Moxnes J.F., Nevstad G. // Proc. 21th Intern. Sympos. Ballistics, Adelaide, 2004. P. 752.
20. Grady D.E., Hightower M.M. // Proc. Intern. Conf. On Material Effects of Shock Wave and High Strain-Rate Phenomena, 1990. P. 12.