

УДК 623.4.082.6; 623.565; 004.942

К ВОПРОСУ О ВЛИЯНИИ РАЗРУШЕНИЯ КОРПУСА ОСКОЛОЧНО-ФУГАСНОГО СНАРЯДА НА ПРОЦЕСС ФОРМИРОВАНИЯ ОСКОЛОЧНОГО ПОЛЯ

Ю. М. СИДОРЕНКО, канд. техн. наук (НТУУ «Киевский политехнический институт»)

С помощью двумерного моделирования исследован процесс расширения корпуса 152-мм осколочно-фугасного снаряда (ОФС). Рассмотрены волновые процессы, проходящие в продуктах детонации заряда взрывчатого вещества, донной части корпуса ОФС. Исследовано влияние на формирование пространственно-массового распределения осколков искусственно отделенной донной и искусственно разрушенной цилиндрическо-оживальной частей расширяющегося корпуса ОФС.

За допомогою двовимірного моделювання досліджено процес розширення корпусу 152-мм осколково-фугасного снаряда (ОФС). Розглянуто хвильові процеси, що мають місце в продуктах детонації заряду вибухової речовини, донній частині корпусу ОФС. Досліджено вплив на формування просторово-массового розподілу осколків штучного відділення донної та штучно зруйнованої циліндрично-оживальної частин корпусу ОФС, що розширюється.

Process of body expansion of a 152-mm high-explosive shell (HES) was investigated using two-dimensional modelling. Wave processes which occur in detonation products of the explosive substance charge and the HES bottom part are considered. Influence on formation of the spatial-mass distribution of fragments of the artificially separated bottom and the artificially destroyed cylindrical-ogival parts of the HES expanding body was investigated.

Как известно, основу всех боеприпасов, состоящих на вооружении армий разных стран мира, составляют осколочно-фугасные снаряды (ОФС). Поэтому вопросы, связанные с их модернизацией и созданием новых усовершенствованных образцов, являются достаточно актуальными. Однако их решение сталкивается с рядом проблем. В условиях ограниченного финансирования новых разработок конструкторы уделяют все больше внимание методам компьютерного моделирования процессов функционирования различных осколочных боеприпасов. Экспериментальным и более дорогим методам отводится роль корректировки численных. Кроме того, они также остаются методами, с помощью которых принимается окончательное решение о правильности введения в ОФС тех или иных конструктивных изменений. Общим для обоих методов является то, что итог их проведения — получение информации о параметрах осколочного поля ОФС, т. е. пространствен-

но-массовом распределении осколков $f(\varphi, m)$ и годографе их скоростей $v_0(\varphi)$ по меридиональному углу разлета φ .

Если решать данную задачу численными методами, например, с помощью компьютерных программ «Гефест» или «LasTan2D» [1, 2], следует отметить, что большинство существующих методик моделирования решают задачи физики взрыва в континуальной постановке, т. е. без учета разрушения металлических корпусов ОФС. Тогда на первый план встают два вопроса: 1) определение размера расчетной ячейки и их количества, которые дают наиболее правильное и полное решение задачи; 2) определение времени окончания расчета каждой конкретной задачи. Считается, что использование континуальной модели правомочно только до момента времени, когда в корпусе конструкции появляется первая трещина.

С целью ответа на первый вопрос проведена работа по оценке влияния размеров расчетной конечно-разностной сетки на процесс расширения корпуса макета № 12 [3]. По

© Ю. М. СИДОРЕНКО, 2009

программе «Гефест» [1] проведено два расчета процесса взрыва стандартного осколочного макета № 12 с двумя разными расчетными сетками 100 и 625 тыс. расчетных ячеек. Задача решалась в двумерной эйлеровой постановке. Общая продолжительность расчета на компьютере «Pentium-III» 600 МГц составила соответственно 40 и 600 ч. Наиболее существенными результатами перехода на более подробную сетку стало увеличение количества наблюдаемых пульсаций в стенке корпуса макета и продуктах детонации (ПД) заряда взрывчатых веществ (ВВ), а также детальное выявление их структуры. Кроме того, сравнение результатов расчетов показало, что распределение массы корпусов макетов по 2-градусным угловым зонам разлета практически не изменилось. Таким образом, сделан вывод, что для проектирования новых и модернизации штатных ОФС, когда требуется большой перебор разных вариантов конструкций, использование сетки в 100...150 тыс. ячеек является вполне достаточным.

Одним из расчетов на такой сетке (100 тыс. эйлеровых ячеек) был расчет процесса взрыва 152-мм ОФС 53-ОФ-540 [4]. Исследование волновых процессов в донной части корпуса показало формирование конической зоны $R-R$. Высказано предположение, что в дальнейшем по этому направлению произойдет угловой откол дна. Если данное предположение окажется справедливым, то это придаст второму вопросу моделирования задач физики взрыва в континуальной постановке еще большую актуальность, так как в основу континуального моделирования закладывается именно временной критерий окончания проведения математических расчетов. На сегодня он определяется как время, которое соответствует длительности двойного пробега детонационной волны по заряду ВВ. В свою очередь, этот момент приблизительно соответствует ситуации, когда корпус ОФС, изготовленный из средне- или высокоуглеродистой стали, расширится из ненапряженного состояния на 40...50 %. Экспериментальные данные оптической съемки процесса взрыва стальных цилиндрических оболочек, изготовленных из

таких материалов, свидетельствуют о том, что их корпуса к этому времени еще сохраняют свою сплошность [5–8]. Именно это обстоятельство и положено в основу обоснования правомерности использования такого критерия.

Однако, учитывая отличительные особенности конструкции реального ОФС среднего калибра от конструкций оболочек, рассмотренных в работах [5–8], можно утверждать, что высказанное в работе [4] предположение об отделении дна снаряда по зоне $R-R$ может существенно повлиять на весь процесс формирования осколочного поля. Это связано с тем, что момент времени, когда формируется зона $R-R$, составляет примерно 55 % полного времени расчета задачи. Таким образом, можно предположить, что в образовавшуюся в результате разрушения трещину ПД заряда ВВ начнут свой выход наружу. Далее давление внутри снаряда начнет резко падать. Нагрузка на внутреннюю поверхность корпуса уменьшится, следствием чего станет снижение начальной скорости полета частей корпуса и изменение их направления полета.

В связи с существенным ростом производительности компьютерной техники за последнее десятилетие проведено повторное моделирование процесса взрыва этого снаряда с использованием уже расчетной сетки порядка 1 млн ячеек. Цели моделирования:

- детальное исследование физических процессов формирования зоны $R-R$ в донной части корпуса ОФС;
- установление, что обнаруженное формирование зоны $R-R$ не является ошибкой расчета на грубой сетке. Исследование влияния искусственного отделения донной части корпуса от его цилиндрической части.

Моделирование проведено с использованием программы «Гефест» на сетке размером $500 \times 1800 = 900$ тыс. ячеек. Информация о состоянии ПД и металла корпуса ОФС записывалась компьютером с временным шагом 0,25 мкс. Поведение материала корпуса описывали системой уравнений пластического течения Прандля–Рейсса. Уравнение объемной сжимаемости металла корпуса ОФС при-

нято в форме Тэта. Заряд ВВ — тринитротолуол. Расширение ПД описывали уравнением в форме Джонса–Уилкинса–Ли (JWL), параметры которого выбирали по данным справочника [9]. Для расчетов использовали компьютер с процессором Intel Core2Quad 2,83ГГц. Продолжительность расчета состави-

ла 200 ч. Соответствующие кадры компьютерного моделирования представлены на рис. 1.

Переход на сетку с повышенной разрешающей способностью позволил увидеть наиболее сложные волновые процессы в донной части, где имеет место наложение осевых и радиальных пульсаций волн сжатия и растяжения. Соответствующие кадры компьютерного моделирования представлены на рис. 2 (см. обложку с. 3), из которого видно, что после отражения детонационной волны от внутренней поверхности дна (84 мкс) в нем формируется сферическая ударная волна (УВ) сжатия SW_1 . Одновременно в ПД возникает отраженная УВ сжатия SW_2 , в которой давление на фронте поднимается с 21 ГПа перед отражением до 41,2 и 43,6 ГПа после для сеток соответственно в 100 и 900 тыс. ячеек.

Данный результат свидетельствует о том, что, во-первых, переход на сетку с меньшим размером расчетной ячейки сопровождается уточнением значения давления в отраженной в ПД ударной волне на 5,5 %. Во-вторых, повышение значения давления в этой отраженной волне по сравнению со значением в падающей волне на внутреннюю поверхность дна, составило 22,6 ГПа (108 %), или в 2,076 раза больше. Это число хорошо согласуется с выводами из теории отражения детонационных волн от абсолютно жесткой стенки. Как известно, теоретическое максимальное увеличение соответствующего давления в 2,37 раза больше чем в падающей отраженной ударной волне.

В дальнейшем, распространяясь по дну, волна SW_1 к 87 мкс подходит к наружной поверхности корпуса и начинается процесс ее отражения. Ввиду того, что отражение УВ происходит от границы сред при условии, когда среда, по которой распространялась волна SW_1 , имеет плотность выше чем вторая, то в дне формируется волна разрежения RW_2 с отрицательным значением давления на фронте. Аналогичные процессы происходят и при отражении волны SW_1 от наружной боковой поверхности корпуса ОФС с формированием косой волны разрежения RW_1 . Соответствующие графики распределения давления в ПД и дне корпуса ОФС по оси симметрии представлены на рис. 3.

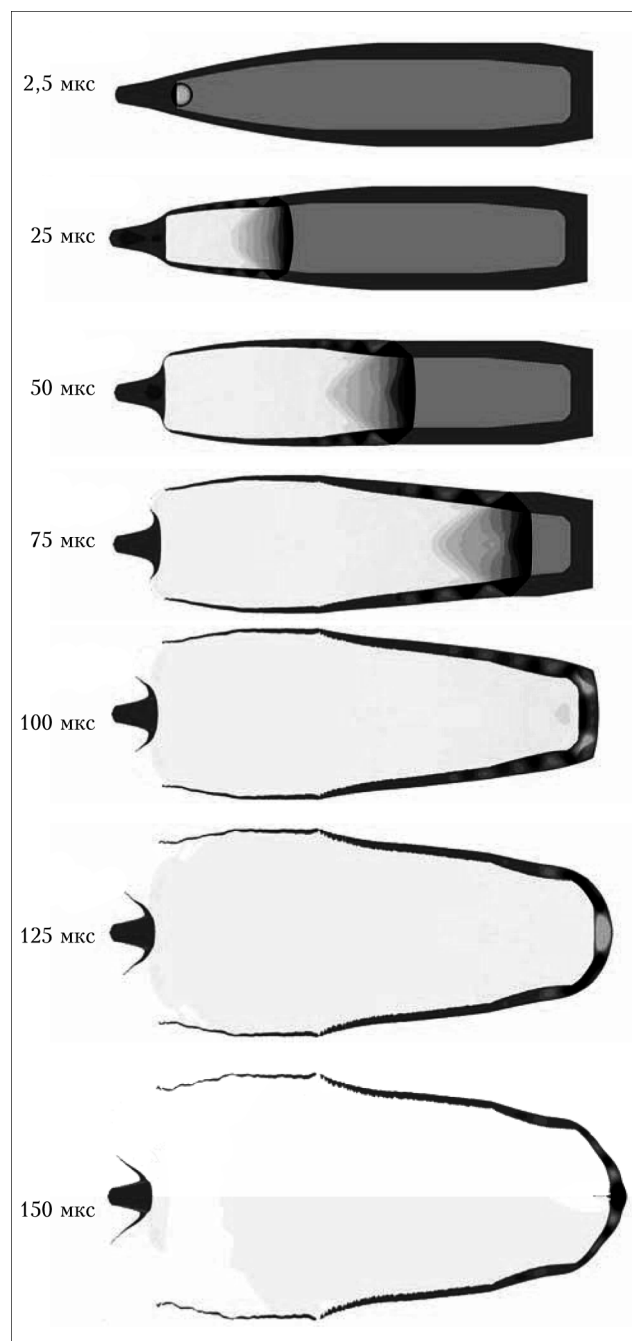


Рис. 1. Процесс взрыва 152-мм ОФС 53-ОФ-540 (программа «Гефест»)

Обращает внимание поведение давления в отраженной УВ в ПД. На рис. 3 видно, что по мере удаления фронта УВ от границы раздела двух сред в глубь ПД давление на нем постепенно снижается до 15 ГПа. Однако к $t = 91$ мкс на расстоянии 27 мм от внутренней поверхности дна давление резко увеличивается до 26 ГПа. Это стало следствием того, что падающий ДФ на боковую внутреннюю поверхность придонной части корпуса ОФС формирует аналогичную отраженную УВ в ПД. В дальнейшем фронт этой отраженной волны движет по направлению к оси симметрии корпуса снаряда. К указанному выше моменту времени наступает встреча на оси симметрии двух отраженных УВ от внутренних боковой и донной поверхностей корпуса. Далее происходит их интерференция с соответствующим повышением значения давления в точке встречи. Данный результат хорошо просматривается на рис. 2 ($t = 91$ мкс) в виде темного пятна в ПД на оси симметрии.

На рис. 3 (кривые 2, 3) также обращает внимание наличие второго пика давления вслед за основным, но уже с меньшим значением. Особенно четко он прослеживается на рис. 3, кривая 2 ($t = 87$ мкс). Такая картина также может быть объяснена особенностью поведения фронта отраженной УВ. Ввиду того, что фронт отраженной от внутренней боковой поверхности придонной области корпуса ОФС имеет криволинейную форму, то к этому моменту времени к оси симметрии приходит только эта одна УВ. Далее происходит процесс его интерференции, но уже без участия УВ отраженной от дна корпуса ОФС.

К моменту времени 91,5 мкс в дне также начинается процесс интерференции двух волн, но теперь волн разрежения RW_1 и RW_2 , которые движутся навстречу друг другу. При этом моделирование на более подробной сетке действительно подтверждает выдвинутое ранее предположение о том, что к моменту $t = 94,5$ мкс формируется коническая зона высоких растягивающих напряжений $R-R$. На рис. 2 эта область изображена характерным белым пятном. По результатам моделирования наибольший уровень растяги-

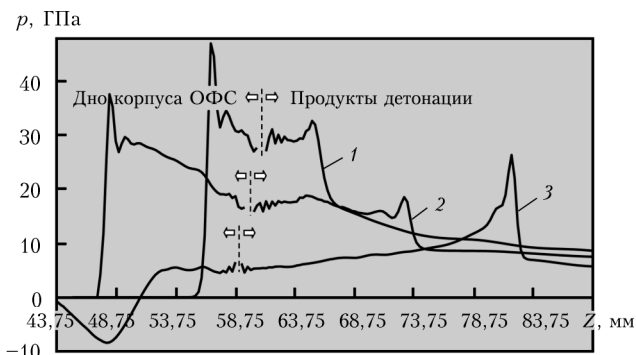


Рис. 3. Распределение давления в ПД и дне корпуса ОФС вдоль оси симметрии: 1 – $t = 84$; 2 – 87; 3 – 91 мкс

вающих напряжений в этой области составляет 11,27 ГПа.

В работах [5, 10] для сравнения приведены экспериментальные значения напряжений разрушения при отколе для различных сталей, которые могут достигать 4... 6 ГПа (таблица).

Разрушающее напряжение в различных сталях

Материал	σ_p , ГПа
45	2,45
SAE-1020	1,61
SAE-4340	3,08
Армко-железо	1,65
40X	4,2
35XHM	4,35
ЭП386	6,2

Таким образом, очевидно, что реализуемое значение растягивающего напряжения в зоне $R-R$ достаточно для того, чтобы ожидать формирования трещины, по которой в последующем произойдет отделение дна от цилиндрической части корпуса ОФС.

Для оценки степени влияния возможного отделения донной части корпуса ОФС на весь процесс разлета масс его частей по меридиональному углу проведено моделирование с искусственным (принудительным) отделением. Для этого в момент времени 94,5 мкс, когда формируется зона $R-R$ с наиболее высоким значением растягивающего напряжения, проводится ручная замена материала в эйлеровых ячейках с металла корпуса на окружающий корпус ОФС невозмущенный воздух по линии $R-R$. При этом ширину фор-

мируемого зазора выбирают таким образом, чтобы компьютерная программа смогла промоделировать свободный выход находящихся внутри снаряда под высоким давлением ПД через полученный зазор наружу. После этого момента времени расчет продолжают дальше.

Кадры компьютерного моделирования процесса деформирования корпуса ОФС с искусственным отделением донной части представлены на рис. 4 (см. обложку, с. 3). Как видим, методика моделирования достаточно хорошо воспроизводит процесс отделения дна от цилиндрической части корпуса. Наблюдается выход ПД наружу через сформированный зазор. Сравнение геометрической формы донной части корпуса ОФС в различные мо-

менты времени с ее отделением (рис. 4) и без (см. рис. 2) в конце расчета показывает, что в результате отсутствия влияния растягивающих напряжений со стороны цилиндрической части корпуса дно после отделения сохраняет более компактную форму.

Для оценки степени влияния отделения донной части корпуса ОФС на процесс формирования диаграммы разлета его массы использовали метод «вмороженных» маркеров [11], использование которого вызвано тем, что программа «Гефест» построена на эйлеровом подходе по описанию поведения различных сред. В отличие от лагранжевого подхода, при котором каждый узел расчетной сетки жестко прикреплен к конкретному месту исследуемой конструкции и соответственно движется вместе с ней в процессе ее деформации, что позволяет легко следить за ее поведением, эйлеровый подход этого не обеспечивает. Как известно, особенностью эйлерового подхода является то, что в одной и той же неподвижной эйлеровой ячейке в разное время могут находиться не только разные части одной среды, например, корпуса ОФС, но и разные среды, например, вместо металла корпуса появляются ПД. Поэтому система математических уравнений, решаемых программой «Гефест», дополнена уравнениями, описывающими поведение специальных реперных точек, размещенных внутри корпуса ОФС и двигающихся вместе с ним по принципу лагранжевых узлов. Схема размещения маркеров внутри корпуса 152-мм ОФС 53-ОФ-540 представлена на рис. 5, где № 3, 11, 22, 34 — точки-маркеры, размещенные в основных характерных частях корпуса ОФС, соответственно в донной, придонной конической, цилиндрической и оживальной частях.

Графики изменения во времени радиальной v_R , осевой v_Z и полной v скоростей маркеров, находящихся в различных частях корпуса ОФС, с учетом и без учета отделения донной части представлены на рис. 6.

На рис. 6 видно, что процесс разгона различных частей корпуса ОФС практически заканчивается за время трех-четырех волновых пульсаций. Можно также констатировать тот факт, что процесс искусственного отделения

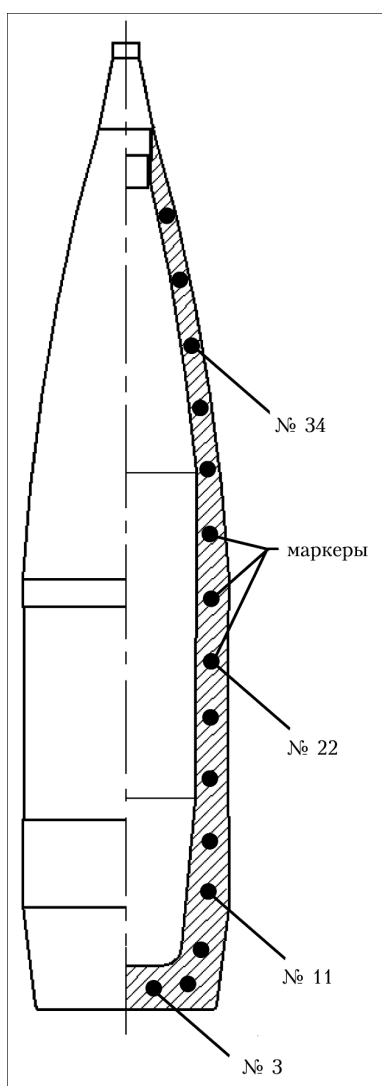


Рис. 5. Схема размещения маркеров в корпусе 152-мм ОФС 53-ОФ-540

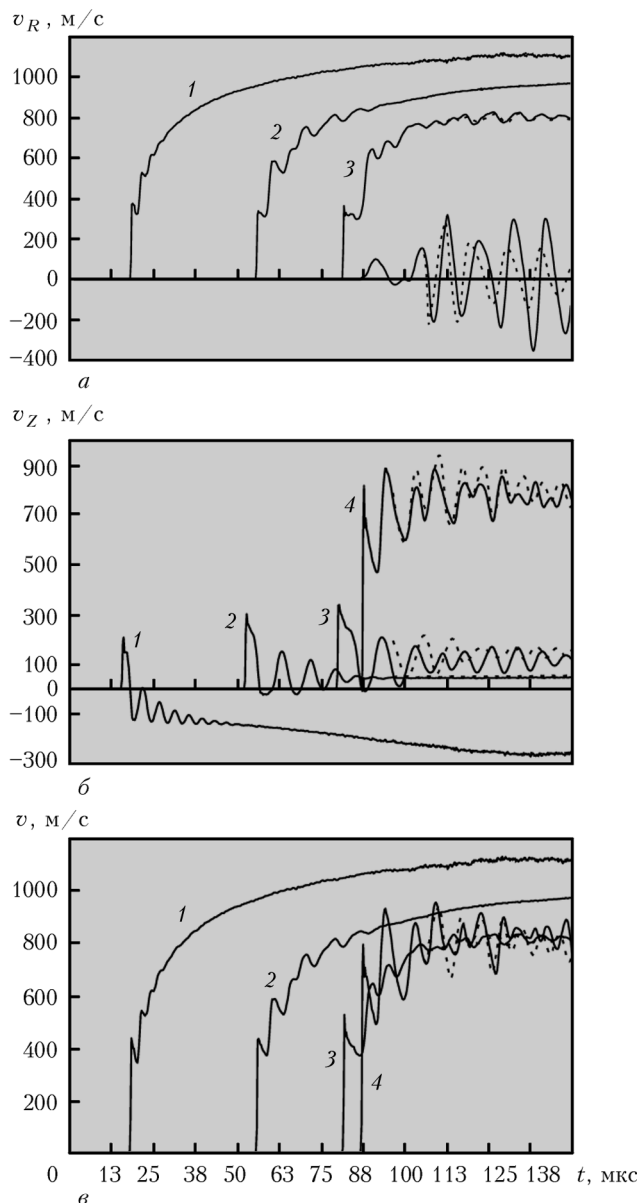


Рис. 6. Набор радиальной v_R (а), осевой v_Z (б) и полной v (в) скоростей маркерами, находящимися в различных частях корпуса ОФС: 1 — оживальная часть (№ 34); 2 — цилиндрическая (№ 22); 3 — придонная коническая (№ 11); 4 — донная часть (№ 3) без учета ее отделения (сплошная кривая) и с учетом (штриховая)

донной части корпуса от цилиндрической практически не повлиял на формирование как радиальной и осевой компонент скорости, так и значения полной скорости v . Небольшие расхождения в значениях наблюдаются для амплитуд в волновых пульсациях УВ в донной части корпуса ОФС. Однако на рис. 6, кривая 4 видно, что наличие данных расхождений на итоговое (интегральное) значение как компонент, так и самого значения скорос-

ти движения маркера не оказало принципиального влияния.

Наиболее точно оценить влияние отделения дна на процесс разлета корпуса ОФС можно, проанализировав полученную информацию в другом виде. Обработав данные о компонентах скорости каждого маркера можно построить зависимость распределения итогового меридионального угла разлета φ вдоль образующей корпуса ОФС по зависимости: $\varphi = \arctg(v_R/v_Z)$ (рис. 7).

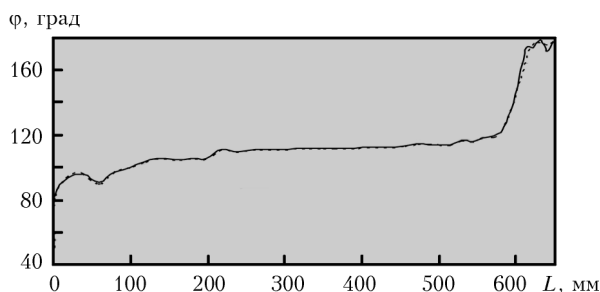


Рис. 7. Распределение меридионального угла разлета вдоль образующей корпуса ОФС 53-ОФ-540 в конце разгона с учетом отделения донной части (сплошная кривая) и без учета (штриховая)

Поведение функции распределения угла разлета φ вдоль образующей корпуса ОФС подтверждает предварительный результат расчета — несущественное влияние отделения его донной части от цилиндрической на процесс разлета. Некоторое небольшое расхождение в поведении графиков также наблюдается в придонной и донной областях. Это можно объяснить тем, что время, необходимое ПД выйти наружу через сформированный искусственный зазор, чтобы снизить давление внутри снаряда и повлиять на процесс его разлета, намного больше времени трех волновых пульсаций в стенке корпуса. А именно, за это короткое время от 16 до 20 мкс и формируется 80...85 % значения угла и скорости разлета массы корпуса ОФС.

Объяснением данному факту может стать влияние значения толщины стенки корпуса в месте сформированного зазора. Поскольку донная часть корпуса ОФС является наиболее толстостенной (для сравнения толщина стенки в донной части корпуса составляет 32 мм, цилиндрической части 20 мм, а оживальной — 10 мм), то очевидно, что ПД раскрыть

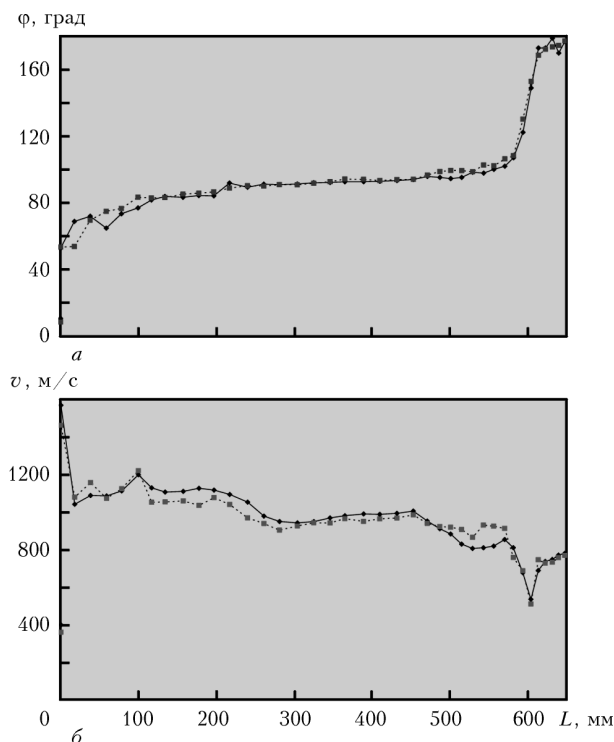


Рис. 9. Распределение меридионального угла разлета (а), скорости разлета (б) вдоль образующей корпуса ОФС 53-ОФ-540 с учетом (сплошная кривая) и без учета (штриховая) искусственного разрушения

сформированный зазор в этом месте тяжелее по сравнению с другими областями корпуса. Тогда, для того чтобы исключить зависимость сделанного вывода от влияния данного фактора на процесс разлета корпуса ОФС, необходимо провести дополнительные исследования.

Для этого промоделирован еще один вариант конструкции ОФС, когда вдоль всей образующей корпуса ОФС искусственным путем последовательно вводились «зазоры-трещины» аналогично рассмотренному выше варианту с отделением донной части. Принято условие, что «зазоры-трещины» формировались по середине между размещенными в корпусе маркерами в момент окончания первого волнообмена волн сжатия и растяжения в конкретном месте корпуса. Кадры компьютерного моделирования в данной постановке представлены на рис. 8 (см. обложку с. 3). Расчетное распределение меридионального угла ϕ и скорости разлета v вдоль образующей корпуса ОФС с учетом и без учета искусственно введенного разрушения представлено на рис. 9.

Из рисунка видно, что введение искусственного разрушения в континуальную мето-

дику моделирования практически так же, как и ранее, не влияет на процесс разлета корпуса ОФС. Независимо от того, что толщина стенки корпуса в оживальной части почти в 3 раза меньше и раскрыть небольшой зазор ПД могут легче и быстрее, длительность фазы трех волнообменов (пульсаций) в этом месте тоже меньше, так как волны сжатия и растяжения тоже проходят меньший путь.

По результатам проведенных расчетов можно утверждать, что моделирование процессов расширения корпусов в континуальной постановке для определения параметров пространственно-массового распределения массы и скоростей различных частей корпуса с использованием временного критерия окончания расчетов, определяемого как время двойного пробега ДФ по заряду ВВ, является вполне адекватным. 🐼

1. Сидоренко Ю. М. Методика двумерного компьютерного моделирования процессов функционирования осколочно-фугасных боеприпасов // Артиллерийское стрелковое вооружение. — 2005. — № 1. — С. 18–21.
2. Лавриков С. А., Чепков И. Б. Численное моделирование подрыва осколочно-фугасного боеприпаса // 36. праць 2-ї Міжнарод. конф. «Артилерійські ствольні системи, боеприпаси, засоби АР та КВ», 27–29 жовт. — ДНТЦ АСВ, 1998. — С. 52–68.
3. Одинцов В. А., Сидоренко Ю. М. Моделирование процесса взрыва стандартного осколочного цилиндра с различной степенью детализации // Оборон. техника. — 2001. — № 1–2. — С. 17–20.
4. Одинцов В. А., Сидоренко Ю. М., Туберозов В. С. Моделирование процесса взрыва осколочно-фугасного снаряда с помощью двумерного гидрокода // Там же. — 2000. — № 1/2. — С. 49–55.
5. Физика взрыва / Под ред. Л. П. Орленко. — Изд. 3-е, перераб. — В 2 т. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2002. — Т. 2. — 656 с.
6. Одинцов В. А., Чудов А. А. Расширение и разрушение оболочек под действием продуктов детонации // Проблемы динамики упруго-пластических сред / Под ред. Г. С. Шапиро. — М.: Мир, 1975. — С. 85–154.
7. Селиванов В. В., Соловьев В. С., Сысоев Н. Н. Ударные и детонационные волны. Методы исследования. — М.: Изд-во Моск. гос. ун-та, 1990. — 264 с.
8. Колобанова А. Е., Селиванов В. С. Основы динамики разрушения оболочек. — М.: Изд-во Моск. гос. техн. ун-та, 1996. — 98 с.
9. LLNL explosive handbook. Properties of chemical explosives and explosive simulants / В. М. Dobratz. Livermore, 1981. — 257 p.
10. Ударно-волновые явления в конденсированных средах / Г. И. Канель, С. В. Разоренов, В. Е. Фортов и др. — М.: Янус-К, 1996. — 408 с.
11. Численные методы в задачах физики взрыва и удара: Учебник для втузов / А. В. Бабкин, В. И. Колпаков, В. Н. Охитин и др. / Под ред. В. В. Селиванова. — М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2000. — Т. 3. — 516 с.