

УДК 004.942:623.565:623.451.2

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

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВЗРЫВНОГО МЕТАНИЯ РАЗРЕЗАННОГО ОСКОЛОЧНООБРАЗУЮЩЕГО ДИСКА

Представлены результаты математических исследований, целью которых было определение влияния замены одного стального толстостенного диска естественного дробления на набор из двух, трех и четырех дисков одинаковой толщины на величину угла разлета осколочной массы, формируемой в результате процесса взрыва, а также скорости ее движения в границах данного угла. Данные исследования будут полезными как при оценке опасности осколочного действия различных осколочно-фугасных боеприпасов, так и самодельных взрывных устройств, которая проводится в рамках судебной взрывотехнической экспертизы.

Представлено результати математичних досліджень, метою яких було встановлення впливу заміни одного товстостінного диску природнього дроблення на набір з двох, трьох та чотирьох дисків однакової товщини на значення кута розльоту осколкової маси, що формується в результаті процесу вибуху, та швидкості її руху в межах даного кута. Дані дослідження є корисними як під час проведення оцінки ступеня небезпеки від осколкової дії різноманітних осколково-фугасних боеприпасів, так і саморобних вибухових пристроїв, яка проводиться в рамках судової вибухотехнічної експертизи.

К сожалению, количество террористических актов, совершенных в мире с применением разнообразных взрывных устройств (ВУ) неуклонно растет. Одним из основных поражающих факторов таких ВУ является высокоскоростной поток осколков. Данный поток, в основном, формируется в результате как взрывного разрушения несущего корпуса ВУ, например, штатного армейского осколочно-фугасного снаряда, так и взрывного метания специально изготовленного осколочного блока самодельного ВУ, содержащего либо предметы естественного дробления (металлические диски, пластины, облицовки), либо готовые поражающие элементы (ППЭ): гвозди, гайки, шайбы и т. п.

Во время проведения судебной взрывотехнической экспертизы эксперту криминалисту, кроме всего прочего, необходимо отвечать на вопросы относительно [1]:

- конструкции ВУ и способе его изготовления (самодельное или промышленное) и его элементов;

- видовой принадлежности ВУ (артиллерийская мина, граната, и т. д.);

- уровня профессиональной подготовки лиц, которые изготовляли и приводили в действие ВУ;

- силы взрыва в тротиловом эквиваленте и параметрах поражающих факторов взрыва, в том числе осколочном.

Ответы на данные вопросы можно получить двумя способами: экспериментально и численно. В виду высокой стоимости проведения натурных исследований и ограниченного финансирования проведения данных работ специалисты в области вооружения, военной техники и судебной криминалистической экспертизы все большее предпочтение отдают методам численного анализа, при этом экспертам отводится сопровождающая и контролирующая роль.

В работах [2, 3] уже описаны некоторые особенности процесса формирования осколочного поля при взрыве кумулятивных выстрелов ручных противотанковых гранатометов РПГ-7 и РПГ-18. По результатам исследований, проведенных с использованием методов

© Ю.М. СИДОРЕНКО, 2014

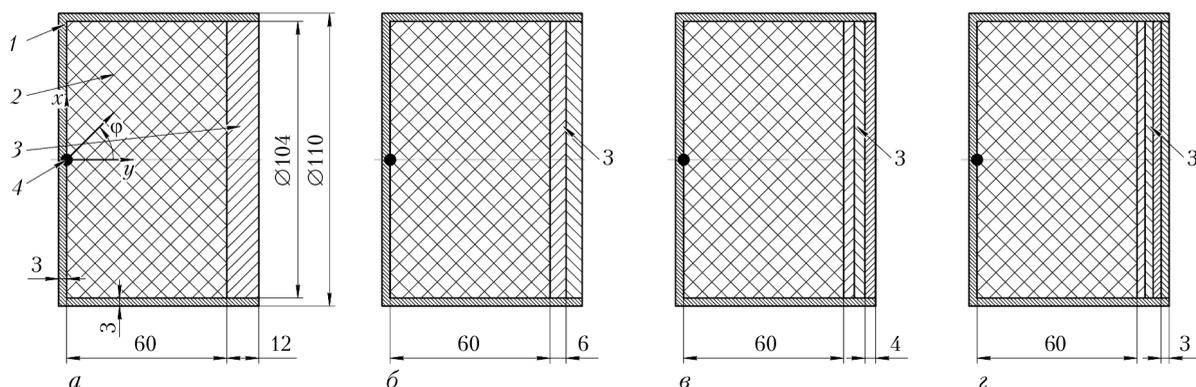


Рис. 1. Расчетные схемы ВУ с осколочнообразующим диском естественного дробления целым (а), разрезанным на две (б), три (в) и четыре (г) части: 1 – корпус; 2 – заряд взрывчатого вещества; 3 – осколочный диск (части диска); 4 – место инициирования детонации заряда ВВ

компьютерного моделирования процесса взрывного расширения и деформирования тонкостенных корпусов головной части выстрелов РПГ было установлено, что в отличие от выстрела РПГ-18, который имел три явно выраженных осколочных поля, у выстрела РПГ-7ВМ формируется четыре узконаправленных осколочных потока. Причем данный метод исследования позволил легко установить причину такого результата: наличие малого зазора между взрывной линзой и корпусом выстрела.

В данной работе такой же метод исследования был использован для определения опасной зоны осколочного поражения ВУ: величины меридионального угла разлета осколков, который формируется в результате взрывного метания набора дисков естественного дробления.

Рассматривались конструкции ВУ, в которых проводилась замена одного толстостенного диска естественного дробления путем его разрезания на два, три и четыре диска одинаковой толщины. Расчетные схемы ВУ изображены на рис. 1.

Все представленные на рис. 1 конструкции имеют цилиндрический корпус 1 с толщиной стенки 3 мм и закрытое дно. Диаметр его наружной поверхности составляет 110 мм. Внутри корпуса 1 размещается заряд ВВ 2, взрывчатая смесь Н-6 (RDX – 40 % (гексоген), TNT – 30 % (тринитротолуол), Al – 20 %, Wax – 10 % (пластификатор)) плотностью $\rho = 1760 \text{ кг/м}^3$, скоростью детонации $D =$

$= 7470 \text{ м/с}$, давлением на фронте детонационной волны $P_{CJ} = 29 \text{ ГПа}$ [4, 5].

В месте контакта торцевой поверхности заряда ВВ и внутренней поверхности дно корпуса на их оси симметрии находится точка инициирования детонации 4. В контакте с противоположным торцом заряда ВВ находится или один диск 3 толщиной 12 мм (рис. 1, а) или два диска толщиной 6 мм (рис. 1, б), три диска толщиной 4 мм (рис. 1, в), или четыре диска (рис. 1, г) толщиной 3 мм каждый. Величина воздушного зазора между ними составляет 0,1 мм.

Задачи взрывного метания металлических пластин уже рассматривались в работах [6–9]. В данных работах использовалась компьютерная программа «Гефест» [10–12]. В основу ее численного алгоритма заложена полная система уравнений в эйлеровых цилиндрических координатах для продуктов детонации (ПД) и уравнения пластического течения Прандтля–Рейсса для металла, как идеальной упруго-пластической среды. Расширение корпуса метательного блока и процесс метания осколочнообразующего диска под действием ПД описывается в рамках континуальной модели, то есть без учета процессов разрушения. Правомочность использования такого подхода на определенных этапах моделирования показана в работах [13, 14].

Однако стоит отметить, что в численный алгоритм программы «Гефест» заложен упрощенный вариант метода концентраций, который позволяет моделировать поведение кон-

тактных границ только между двумя средами (металл-ПД) [11].

При попытке промоделировать взрывное метание двух осколочнообразующих дисков с использованием этой программы в работе [15] было показано, что данная методика (программа «ГЕФЕСТ») не в состоянии воспроизвести с достаточной точностью данный процесс.

Тогда для решения поставленной задачи использовался метод конечно-элементного моделирования, реализованный в компьютерной программе «ANSYS/LS-DYNA» [16–21]. В этой программе реализовано большинство известных на сегодняшний день подходов к описанию поведения сплошной среды под действием импульсного нагружения [21, 22].

Наибольшее распространение получили — эйлеровый и лагранжевый. Первый подход описывает поведение подвижной среды при помощи неподвижной конечно-элементной сетки, и в большинстве случаев используется для исследования поведения жидкостей и газов. Другой подход, в отличие от первого, использует подвижную жестко связанную со средой сетку, которая деформируется вместе с ней. Такой подход больше подходит для исследования поведения твердых тел. Учитывая то, что в нашей задаче присутствуют как газообразные среды (продукты детонации и воздух), так и твердые материалы — металлические корпус и диски, компьютерное моделирование целесообразно проводить с использованием смешанного лагранжево-эйлерового подхода.

Расширение корпуса ВУ и процесс деформирования осколочнообразующего диска (дисков) во время метания его (их) продуктами детонации описывалось в рамках континуальной модели.

В связи с тем, что моделирование будет проводиться в континуальной постановке, а во время расширения тонкостенного корпуса 1 он будет иметь большую степень деформации, то для исключения появления в расчетной модели нефизических эффектов, связанных с деформированием лагранжевой конечно-элементной сетки, было принято решение описывать поведение данной части конструкции эйлеровым подходом.

Расширение ПД заряда ВВ в математической модели описывалось с помощью уравнения в форме Джонса-Уилкинса-Ли (JWL):

$$p = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) e^{-R_1 V} + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega E_0}{V},$$

где p , E_0 , V — давление, внутренняя энергия и относительный объем ПД соответственно.

Значения коэффициентов уравнения брались из работ [4, 5].

Поведение воздуха с начальным значением плотности $\rho_0 = 1,26 \text{ кг/м}^3$ описывалось при помощи уравнения состояния в форме линейного полинома:

$$p = C_0 + C_1 v + C_2 v^2 + C_3 v^3 + (C_4 + C_5 v + C_6 v^2) E_0, \quad v = \frac{\rho}{\rho_0} - 1,$$

где p , E_0 , ρ , ρ_0 — давление, внутренняя энергия, текущее и начальное значения плотности воздуха соответственно. Коэффициенты данного уравнения выбирались согласно рекомендациям работы [21].

Для материала корпуса метательного блока и осколочнообразующего диска (дисков) была выбрана сталь 20, поведение которой описывалось при помощи реологической упруго-пластической модели с кинематическим упрочнением «PLASTIC-KINEMATIC» с такими параметрами: $\rho = 7850 \text{ кг/м}^3$; $E = 210 \text{ ГПа}$; $\mu = 0,33$; $\sigma_T = 288 \text{ МПа}$; $E_t = 1 \text{ ГПа}$.

Проанализировав конструкцию ВУ (рис. 1), можно утверждать, что она имеет осевую симметрию. Это позволяет проводить численный анализ в упрощенной двухмерной осесимметричной постановке. Но в такой постановке смешанный лагранжево-эйлеровый подход в программе LS-DYNA не реализован. В этой программе данный подход запрограммирован только для трехмерной (3D) конечно-элементной схемы, которая требует использования существенно большего количества конечных элементов. В результате этого, увеличиваются требования к техническим возможностям компьютерной техники.

Но все же трехмерную конечно-элементную схему ВУ можно несколько упростить. Математическая модель может содержать только 1/4 часть геометрии ВУ, которая формируется путем его условного разрезания двумя взаимно перпендикулярными плоскостями, пересекающимися на оси симметрии. На узлы конечно-элементной сетки, принадлежащих этим плоскостям, накладываются соответствующие граничные условия. Они запрещают им перемещаться в направлениях вектора нормали той плоскости, которой они принадлежат.

Кадры компьютерного моделирования процесса взрыва метательного блока, который имеет в своей конструкции один диск толщиной 12 мм и эквивалентные ему по суммарной толщине три стальные осколочнообразующие диска, толщиной 4 мм каждый, показаны на рис. 2 (см. 2-ю стр. обложки).

На рис. 2 можно наблюдать основные стадии процесса взрывного метания осколочнообразующих дисков.

На 5 мкс с момента детонации заряда ВВ детонационная волна (ДВ) проходит приблизительно половину его высоты. По мере прохождения ДВ вдоль внутренней поверхности дна корпуса метательного блока в его толщине формируется система ударных волн сжатия и разрежения.

По мере своего прохождения от заряда ВВ детонационная волна отражается от внутренней поверхности осколочнообразующего диска толщиной 12 мм (рис. 2, а) и его первой (внутренней) части, полученной путем его

разрезания на три диска толщиной 4 мм каждый. В результате этого отражения в них формируется ударная волна сжатия. На 10 мкс эта волна проходит всю толщину толстостенного 12-мм диска (рис. 2, а). Если же посмотреть на процесс движения этой волны по разрезанному диску (рис. 2, б), то можно увидеть, что в этот момент времени она только переходит из второй (средней) в третью (внешнюю) часть диска в результате их столкновения.

Каждое такое отражение ДВ и столкновение частей разрезанного диска сопровождается резким изменением значения компонент их скорости движения, что подтверждается представленными на рис. 3 и 4 графиками.

Для удобства представления и анализа расчетной информации о поведении каждой части осколочнообразующего диска в процессе его взрывного метания была принята система обозначений. Диск толщиной 12 мм обозначался как «диск № 1–12», а каждая его 1/3 часть — «диск № 1–4», «диск № 2–4», «диск № 3–4», где 4 — обозначает толщину части в миллиметрах, а № 1, № 2, № 3 — ее порядковый номер. При этом часть диска с № 1 находится в контакте с зарядом ВВ, № 2 — посередине, а № 3 — снаружи ВУ.

На представленных зависимостях (рис. 3 и 4) видно, что процесс изменения во времени значений компонент скорости движения дисков имеет пульсационный характер. Хотя, если сравнить поведение осевой компоненты скорости V_z цельного 12-мм диска (рис. 3, б) и его частей (рис. 4, б), видно, что первая группа зависимостей имеет плавный характер.

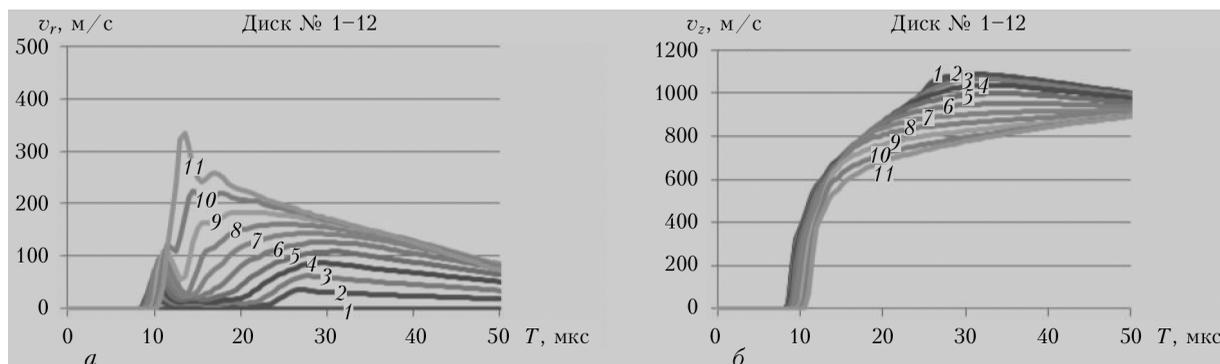


Рис. 3. Компоненты скорости движения (а) радиальная, (б) осевая различных частей осколочнообразующего диска толщиной 12 мм: 1 — 0; 2 — 5,0; 3 — 10,0; 4 — 15,0; 5 — 20,0; 6 — 25,0; 7 — 30,0; 8 — 35,0; 9 — 40,0; 10 — 45,0; 11 — 50,0 мм

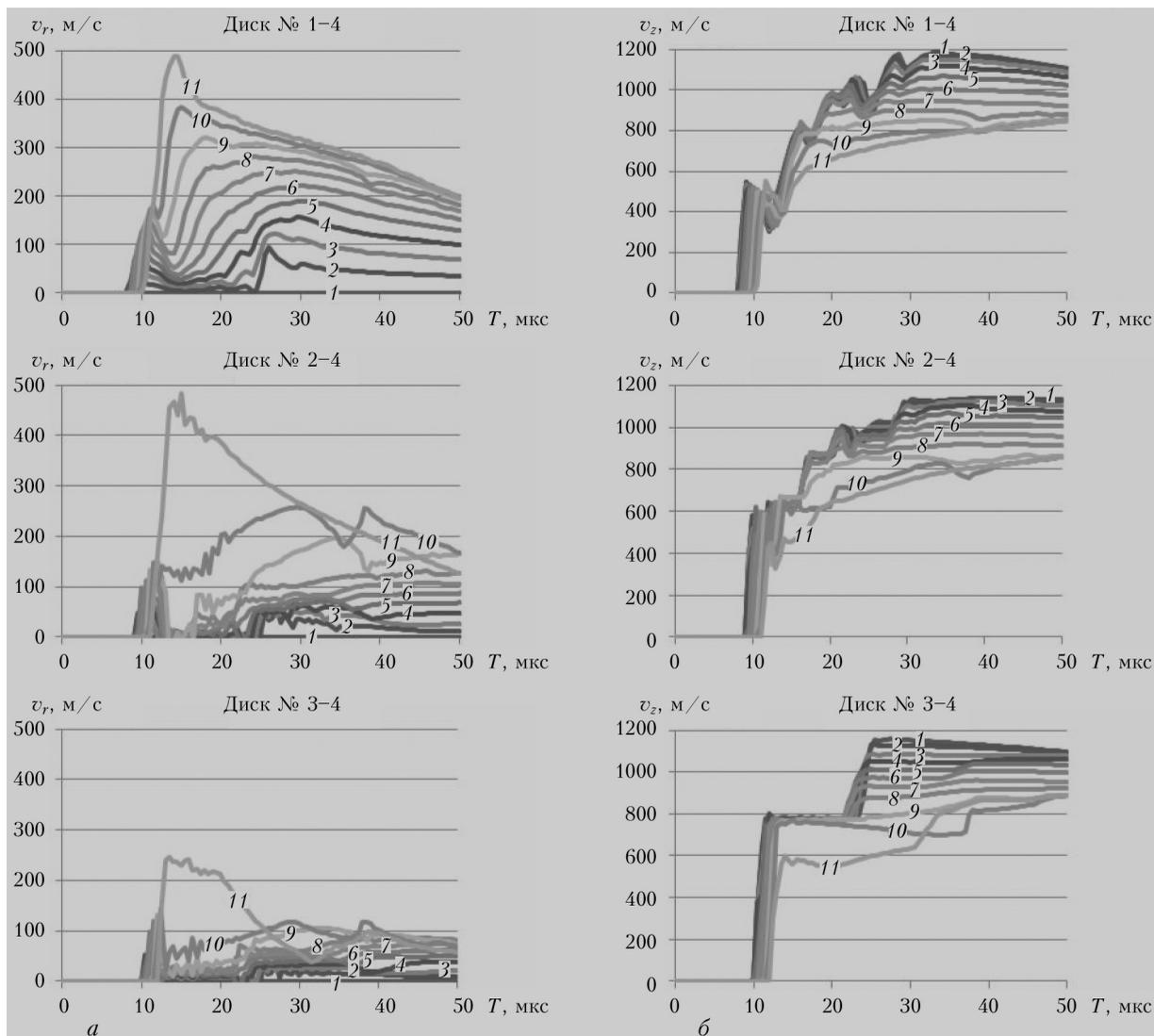


Рис. 4. Компоненты скорости движения (а) радиальная, (б) осевая различных частей осколочнообразующего диска толщиной 4 мм: 1 – 0; 2 – 5,0; 3 – 10,0; 4 – 15,0; 5 – 20,0; 6 – 25,0; 7 – 30,0; 8 – 35,0; 9 – 40,0; 10 – 45,0; 11 – 50,0 мм

Первое резкое увеличение значений радиальной V_r и осевой V_z компонент скорости движения различных частей, метаемых взрывом осколочнообразующих дисков, можно увидеть в районе 10 мкс. Если для диска № 1–12 и его части «диск № 1–4» такое увеличение является следствием отражения от их внутренних торцевых поверхностей ДВ, то для частей диска «диск № 2–4» и «диск № 3–4» — процессом их столкновения друг с другом и частью «диск № 1–4». Данные, представленные на рис. 4, б позволяют утверждать, что длительность этого первого увеличения значений компонент скорости продолжалось приблизительно 2 мкс.

Также зависимости (рис. 3, б) позволяют определить не только количество взаимных столкновений частей разрезанного диска за весь период их взрывного разгона, а и время наступления такого взаимодействия. Например, по поведению графиков V_z части «диск № 1–4» (рис. 4, б) можно констатировать, что внутренняя и средняя части диска на оси симметрии вступали в контакт 5 раз (на 9; 16; 20,5; 29 и 36 мкс). В тоже время средняя часть с наружной контактировали только 2 раза, что характеризуется двумя резкими увеличениями значений V_z графиков части диска «диск № 3–4» в момент времени 12 и 25 мкс.

Также обращает на себя внимание тот факт, что (по истечении 30 мкс с момента детонации заряда ВВ) значение осевой компоненты скорости движения, как цельного осколочнообразующего диска толщиной 12 мм и трех его частей толщиной 4 мм, практически принимает постоянное значение, которое не превышает 1200 м/с. Однако такой вывод нельзя сделать по отношению к радиальной компоненте скорости V_r (рис. 3, *a* и 4, *a*).

На данных рисунках видно, что на 30 мкс значения V_r принимают свои максимальные значения с последующей некоторой стабилизацией данной величины у центральных областей частей диска ($R < 40$ мм) и ее падением у периферийных областей ($R > 40$ мм).

Такое поведение можно объяснить наличием высоких значений степени деформирования именно периферийных областей частей диска. Форму дисков в конце процесса разгона можно увидеть на рис. 5 (см. 3-ю стр. обложки).

На рис. 5 видно, что при разрезании осколочнообразующего диска толщиной 12 мм на две или три части соответственно толщиной 6 мм и 4 мм соответственно, каждая из них имеет схожую тенденцию в процессе своего деформирования: чем ближе часть диска находится к заряду ВВ, тем больше величина ее радиального удлинения. Исключением из этого правила стало разрезание диска на четыре части. На рис. 5, *z* видно, что наибольшее радиальное удлинение имеют средние части — вторая и третья.

Такое поведение диска и его частей естественным образом отобразилось и на поведении как функции меридионального угла φ разлета осколочнообразующего диска, так и на его итоговом значении, которое определялось как

$$\varphi = \arctg \left(\frac{V_r}{V_z} \right),$$

где V_r , V_z — соответственно радиальная и осевая компоненты скорости разлета частей осколочнообразующего диска.

Соответствующие зависимости, описывающие распределение значений угла φ различных областей диска и его частей по середине их толщины, представлены на рис. 6.

На рис. 6 видно, что если не учитывать поведение значений угла φ крайних областей осколочнообразующего диска и его частей ($R > 40$ мм), то можно утверждать, что его изменение вдоль радиуса является практически линейным. При этом для различных схем разрезания диска на части угол наклона представленных на рис. 6 линий различный. Значение тангенса данного угла колеблется в диапазоне от 0,125 град/мм до 0,450 град/мм.

На рис. 7 представлена информация об итоговых значениях меридионального угла разлета φ при взрывном метании цельного и разрезанного на части осколочнообразующего диска толщиной 12 мм.

На рис. 7 видно, что наименьшее значение полного угла разлета 12° имеет конструкция, которая содержит лишь один 12-мм осколочный диск. Если его разрезать на несколько частей, то с увеличением количества поперечных разрезов до трех (разделение диска на три части толщиной 4 мм каждая) прослеживается тенденция увеличения в 2 раза общего угла разлета конструкции (почти до 22°). Причем формируется такой результат за счет разлета частей диска, находящихся в контакте с зарядом ВВ. Хотя разделение диска на четыре части толщиной 3 мм каждая несколько уменьшает это значение до 20° , что можно объяснить особенностями процесса радиального удлинения средних частей диска представленных на рис. 5, *z*.

С другой стороны, для наружных частей диска с увеличением их общего количества в ВУ значения угла их разлета не только не увеличиваются, а прослеживается тенденция его уменьшения с 12 до 8° у конструкции ВУ с разрезанным диском на четыре части толщиной 3 мм каждая. Похожее поведение значения угла разлета крайних дисков наблюдалось при исследованиях процесса взрыва аналогичного метательного блока, в котором вместо замены одного толстостенного диска набором дисков меньшей толщины просто увеличивалось их количество [15].

Здесь следует отметить, что в связи с тем, что все рассмотренные конструкции ВУ имеют осевую симметрию, то представленные

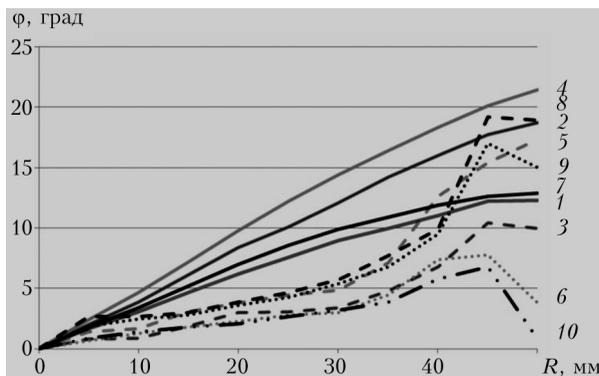


Рис. 6. Распределение итоговых значений меридионального угла ϕ разлета осколочнообразующего диска и его частей по середине их толщины: 1 – диск № 1-12; 2 – диск № 1-6; 3 – диск № 2-6; 4 – диск № 1-4; 5 – диск № 2-4; 6 – диск № 3-4; 7 – диск № 1-3; 8 – диск № 2-3; 9 – диск № 3-3; 10 – диск № 4-3

на рис. 6 и 7 распределения значений меридионального угла описывают движение осколочной массы лишь в одной полусфере разлета. Для установления значения разлета всей конструкции, необходимо полученные расчетные значения умножить на 2, то есть полная осколочная масса толстостенного диска будет сосредоточена внутри конуса разлета со значением угла при вершине – $12 \times 2 = 24^\circ$.

С точки зрения проведения судебной взрывотехнической экспертизы использование криминальными группами при изготовлении ВУ увеличения общего угла разлета различных частей осколочнообразующего диска с ростом их количества помогает, с одной стороны, установить величину опасной зоны разлета осколков несработавшего ВУ, с другой, оценить уровень профессиональной подготовки лиц, которые его изготовляли.

С точки зрения инженера-конструктора осколочнообразующих боеприпасов такое уве-

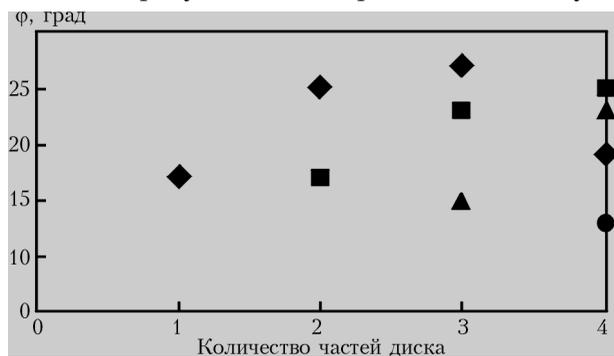


Рис. 7. Итоговое значение меридионального угла разлета осколочнообразующих дисков: \diamond – диск № 1; \square – диск № 2; Δ – диск № 3; \circ – диск № 4

личение общего угла является негативной тенденцией, так как для некоторых типов боеприпасов не решается задача создания узконаправленного на цель потока осколочной массы. Кроме того, для классических артиллерийских снарядов позволяет уменьшить величину «мертвого» угла, в котором практически отсутствуют осколки.

Также для оценки уровня опасности формируемого в результате взрыва ВУ осколочного поля, кроме величины угла разлета осколков, необходима информация о скорости движения V осколков внутри этого угла. Для ее определения можно воспользоваться распределением величины V посередине толщины диска и его частей в радиальном направлении в конце процесса взрывного метания (рис. 8).

На рис. 8 видно, представленное распределение для различных схем разрезания диска на части практически одинаковое, если не учитывать, поведение крайних зон ($R > 40$ мм). Такой результат является ожидаемым. Это связано с тем, что разрезание толстостенного диска на несколько частей меньшей толщины эквивалентно замене его набором дисков меньшей толщины при условии, что их суммарная масса остается не изменой.

Хотя обращает на себя внимание перепад значений скорости между центральными и периферийными областями диска, которое составляет приблизительно 300 м/с. Такой результат указывает на то, что глубина опасной зоны (дальность полета опасных осколков) в

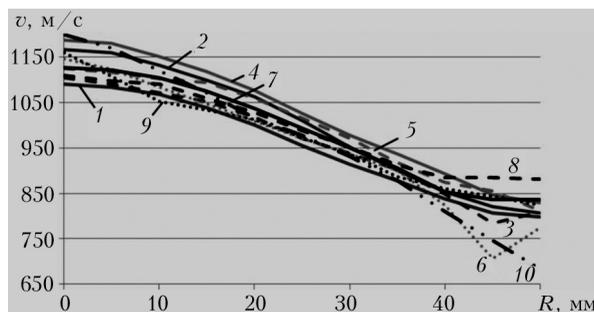


Рис. 8. Распределение итоговых значений скорости полета осколочнообразующего диска и его частей посередине их толщины в радиальном направлении: 1 – диск № 1-12; 2 – диск № 1-6; 3 – диск № 2-6; 4 – диск № 1-4; 5 – диск № 2-4; 6 – диск № 3-4; 7 – диск № 1-3; 8 – диск № 2-3; 9 – диск № 3-3; 10 – диск № 4-3

разных направлениях внутри угловой зоны разлета будет разной.

Выводы

1. Распределение итоговых значений меридионального угла φ разлета по середине их толщины цельного осколочнообразующего диска и разрезанного на две, три и четыре части является практически линейным с тангенсом угла наклона 0,125–0,450 град/мм.

2. Наименьшее значение угла разлета имеет схема конструкции ВУ, которая включает в себя только один толстостенный 12 мм осколочнообразующий диск и составляет 12°.

3. С увеличением количества поперечных разрезов толстостенного диска до трех (разделение диска на три части толщиной 4 мм каждая) прослеживается тенденция увеличения общего угла разлета конструкции почти в 2 раза до 22°. При этом формируется такой результат за счет разлета частей диска, находящихся в контакте с зарядом ВВ.

4. С увеличением количества поперечных разрезов толстостенного диска до четырех значения угла разлета его наружных частей не только не увеличиваются, а прослеживается тенденция их уменьшения с 12 до 8°.

5. Перепад значений скорости движения центральных и периферийных областей как цельного толстостенного диска, так и разрезанного на несколько частей составляет приблизительно 300 м/с, что указывает на формирование разной глубины опасной зоны осколочного поражения (дальность полета опасных осколков) в разных направлениях внутри границ угловой зоны разлета. ➔

Список литературы

1. Прохоров-Лукин Г.В. Методика комплексного дослідження вибухових пристроїв, вибухових речовин і слідів вибуху / Г.В. Прохоров-Лукин, В.І. Пащенко, В.І. Биков та ін. — К.: МЮ України, МВС України, 2007. — 218 с.
2. Пащенко В.И., Бондар М.В., Бізер А.М., Сидоренко Ю.М. Особливості створення скінченно-елементної моделі пострілу ручного протитанкового гранатомету // 36. наук. праць Академії ВМС ім. П.С. Нахімова. — 2011. — Вип. 3(7). — С. 20–29.
3. Пащенко В.И., Бондар М.В., Бізер А.М., Сидоренко Ю.М. Кинематические параметры осколочного поля выстрелов ручных гранатометов // Артиллерийское и стрелковое вооружение. — 2011. — № 4. — С. 3–8.
4. Физика взрыва / С.Г. Андреев, Ю.А. Бабкин, Ф.А. Баум и др. / Под ред. Орленко Л.П. — Изд. 3-е, перераб. в 2 т. — Т. 1. — М.: ФИЗМАТ-ЛИТ, 2002. — 832 с.
5. LLNL Explosive Handbook. Properties of chemical explosives and explosive simulants / В.М. Dobratz, Р.С. Crawford. — Livermore, California, 1985. — 541 p.
6. Одинцов В.А., Долгопятова Н.Р., Туберозов В.С. и др. Влияние положения точки инициирования на характеристики осколочного осевого потока // Оборонная техника, 2002. — № 1/2. — С. 53–59.
7. Одинцов В.А., Долгопятова Н.Р., Анисимов А.Ю., Бубнов М.А. Компьютерное моделирование процессов осевого метания пластин, облицовок и оболочек при различных значениях предела текучести // Оборонная техника, 2003. — № 3/4. — С. 61–69.
8. Сидоренко Ю.М. Особенности процесса взрыва боеприпаса с осевым осколочным полем // Артиллерийское и стрелковое вооружение. — 2006. — № 4. — С. 9–15.
9. Сидоренко Ю.М. О влиянии зазора между корпусом боеприпаса и осколочным блоком на формирование осевого осколочного поля // Артиллерийское и стрелковое вооружение. — 2007. — № 1. — С. 20–26.
10. Колпаков В.И., Ладов С.В., Рубцов А.А. Математическое моделирование функционированиякумулятивных зарядов / Метод. указания. — М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1998. — 36 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. Селиванова В.В. — Т. 3. — М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000. — 516 с.
12. Сидоренко Ю.М. Методика двумерного компьютерного моделирования процессов функционирования осколочно-фугасных боеприпасов // Артиллерийское и стрелковое вооружение. — 2005. — № 1. — С. 18–21.
13. Одинцов В.А., Сидоренко Ю.М. Моделирование процесса взрыва стандартного осколочного цилиндра с различной степенью детализации // Оборонная техника. — 2001. — № 1/2. — С. 17–20.
14. Сидоренко Ю.М. К вопросу о влиянии разрушения корпуса осколочно-фугасного снаряда на процесс формирования осколочного поля // Артиллерийское и стрелковое вооружение. — 2009. — № 2. — С. 24–30.
15. Сидоренко Ю.М. Особливості процесу вибухового метання осколкоутворюючих дисків, що входять до складу осколково-пучкового снаряда // 36. наук. праць Академії ВМС ім. П.С. Нахімова. — 2012. — Вип. 1(9). — С. 86–99.
16. LS-DYNA 971. Keyword user's manual. — Vol. 1. — Livermore software technology corporation (LSTC), 2007. — 2206 p.
17. John O. Hallquist. LS-DYNA. Theory manual. Livermore Software Technology Corporation, March 2006. — 680 p.
18. www.lstc.com.
19. <http://www.ls-dyna.ru/>.
20. www.ansys.com.
21. Математическое моделирование процессов удара и взрыва в программе LS-DYNA / Учебное пособие / А.Ю. Муйземнек, А.А. Богач. — Пенза: Информационно-издательский центр ПГУ, 2005. — 106 с.
22. Рудаков К.М. Чисельні методи аналізу в динаміці та міцності конструкцій / Навч. посібник. — К.: НТУУ «КПІ», 2007. — 379 с.