

Влияние типа контакта между продуктами детонации и металлическим диском на величину его меридионального угла разлета

08, август 2013

DOI: 10.7463/0813.0602548

Сидоренко Ю. М.

УДК 004.942:623.565:623.451.2

Национальный технический университет Украины "Киевский политехнический институт"
yura_michael@ukr.net

Введение

На сегодняшний день эксперты-криминалисты для проведения судебной взрыво-технической экспертизы все чаще используют компьютерные (математические) методы.

Данные методы позволяют получить ответы на такие вопросы [1]:

- уровень профессиональной подготовки лиц, которые изготавливали и приводили в действие самодельное взрывное устройство (СВУ);
- значения параметров факторов взрыва СВУ поражающих человека.

Кроме того, в некоторых ситуациях компьютерные исследования являются практически единственным способом реконструкции криминального происшествия, когда проведение натурного эксперимента физически невозможно или нецелесообразно. В качестве примера такой ситуации можно привести комплексную взрыво-техническую экспертизу по установлению причин взрыва в многоэтажном доме [2].

Однако качество компьютерного моделирования зависит от степени соответствия созданной математической модели исследуемому физическому процессу.

Цель работы

Целью работы было создание математической модели СВУ, позволяющей методом численного моделирования правильно определить значение угловой ширины осколочного поля (меридионального угла разлета осколков) формирующегося в результате разрушения элементов его конструкции.

Объект исследования

В качестве модели СВУ было взято цилиндрическое тело, состоящее из:

1. тонкостенного стального корпуса с одним закрытым торцом;

- заряда ВВ высотой H . Для проведения моделирования был взят состав "Н-6" плотностью $\rho=1760 \text{ кг/м}^3$, скоростью детонации $D = 7470 \text{ м/с}$ и давлением на фронте детонационной волны $P_{CJ} = 29 \text{ ГПа}$ [3, 4]. Точка инициирования детонации заряда располагалась в донной области на оси симметрии конструкции.
- стального диска толщиной 10 мм, который метается взрывом в осевом направлении с торцевой поверхности заряда ВВ. В расчетной схеме модели СВУ (рис. 1) данный диск заменяет набор металлических частиц, которые под действием взрыва заряда ВВ разлетаются в осевом направлении.

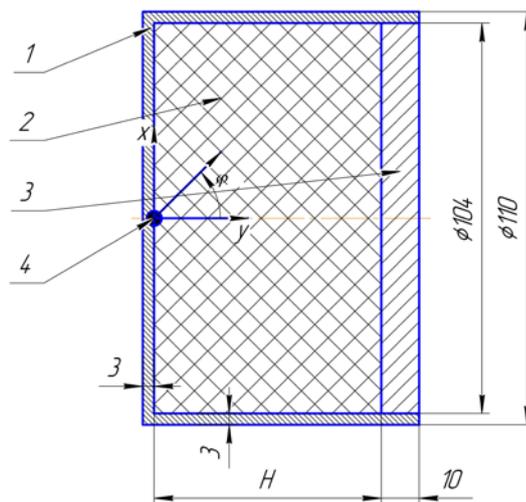


Рис. 1 – Схема модели СВУ:

1 – корпус, 2 – заряд ВВ, 3 – стальной диск, 4 – точка инициирования детонации заряда ВВ

Выбор математического метода описания поведения контактирующих сред

Анализ представленной на рис. 1 конструкции показывает, что ее математическая модель должна учитывать поведение разных по своей структуре сред: газообразных ПД и твердых – корпуса и осколочного диска.

Как известно, поведение газообразных сред рекомендуется описывать с помощью эйлерового подхода. Его особенностью является то, что математическая модель задачи строится с использованием неподвижной, не связанной со средой, конечно-элементной расчетной сетки (КЭС). Поведение твердых сред, как правило, описывается лагранжевым подходом. Такой подход основан на использовании жестко связанной с телом КЭС, которая деформируется вместе с ним.

Если построить математическую модель задачи, которая будет содержать в себе достоинства одновременно как лагранжевого подхода, так и эйлерового, то целесообразно воспользоваться смешанным лагранжево-эйлеровым подходом [5-7].

Одной из известных в мире компьютерных методик, которая позволяет моделировать взрывные процессы с использованием такого смешанного подхода, является компьютерная программа LS-DYNA [5].

Было принято, что в данной программе поведение стальных корпуса и диска (сталь 20) будет описываться реологической упруго-пластической моделью материала с

кинематическим упрочнением "PLASTIC-KINEMATIC". Параметры этой модели имели следующие значения: $\rho=7850$ кг/м³, $E=210$ ГПа, $\mu=0,33$, $\sigma_T=288$ МПа, $E_T=1$ ГПа.

Расширение продуктов детонации описывалось уравнением состояния в форме Джонса-Уилкинса-Ли (JWL):

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

где p , E_0 , V , – соответственно давление, внутренняя энергия и относительный объем ПД. Значения коэффициентов данного уравнения составляли [3, 4]: $A=758,1$ ГПа; $B=8,513$ ГПа; $R_1=4,9$; $R_2=1,1$; $\omega=0,2$; $E_0=10,3$ ГПа.

Поведение окружающего ПД воздуха с начальным значением плотности $\rho_0=1,26$ кг/м³ описывалось при помощи уравнения состояния в форме линейного полинома:

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

где p , E_0 , ρ , ρ_0 – соответственно давление, внутренняя энергия, текущее и начальное значения плотности воздуха. Численные значения коэффициентов данного уравнения выбирались согласно [5].

Кроме того, учитывая то обстоятельство, что конструкция модели СВУ (рис. 1) имеет осевую симметрию, то логично было бы создавать ее математическую модель, а в дальнейшем проводить численный анализ в упрощенной двухмерной осесимметричной постановке. Однако в программе LS-DYNA для такой постановки смешанный лагранжево-эйлеровый подход не реализован. Поэтому моделирование можно было провести только в трехмерной (3D) постановке.

По сравнению с двухмерной, такая постановка требует значительно больших ресурсов компьютерной техники и существенно увеличивает продолжительность решения задачи. Одним из возможных способов облегчающих процесс решения задачи стало создание конечно-элементной модели СВУ на основе только $\frac{1}{4}$ части ее геометрической модели с использованием соответствующих граничных условий.

Определившись с математическим подходом, с помощью которого будет описываться поведение участвующих в процессе взрыва СВУ сред, типом конечного элемента, необходимого для создания конечно-элементной модели задачи, и способом упрощения математической модели, исходя из особенностей ее геометрии, следующим важным этапом создания математической модели задачи стало задание условия контакта между контактирующими средами.

Определение условия математического контакта между средами

В программе LS-DYNA лагранжево-эйлеровое связывание различных сред задается при помощи команды *CONSTRAINED_LAGRANGE_IN_SOLID. Согласно [8, (Remark 4)] разработчики программы рекомендуют для достижения большей стабильности и надежности возникновения и поддержания контакта между средами параметру DIREC, отвечающему за направление контакта, присваивать значение равное 1 либо 2. Оба значения соответствуют ситуации когда, информация передается от среды к среде в направлении вектора нормали. Отличием является то, что 1 соответствует передачи как растягивающей, так и сжимающей нагрузки, а 2 – только сжимающей.

Приняв значение параметра DIREC=1, был проведен расчет процесса взрыва модели СВУ, у которой высота заряда ВВ составляла 60 мм. Процесс деформирования стального диска 3, метаемого продуктами детонации, описывался в рамках континуальной модели (без учета возможного разрушения) [9]. Некоторые кадры компьютерного моделирования данного процесса представлены на рис. 2а.

Численное моделирование процесса взрыва СВУ

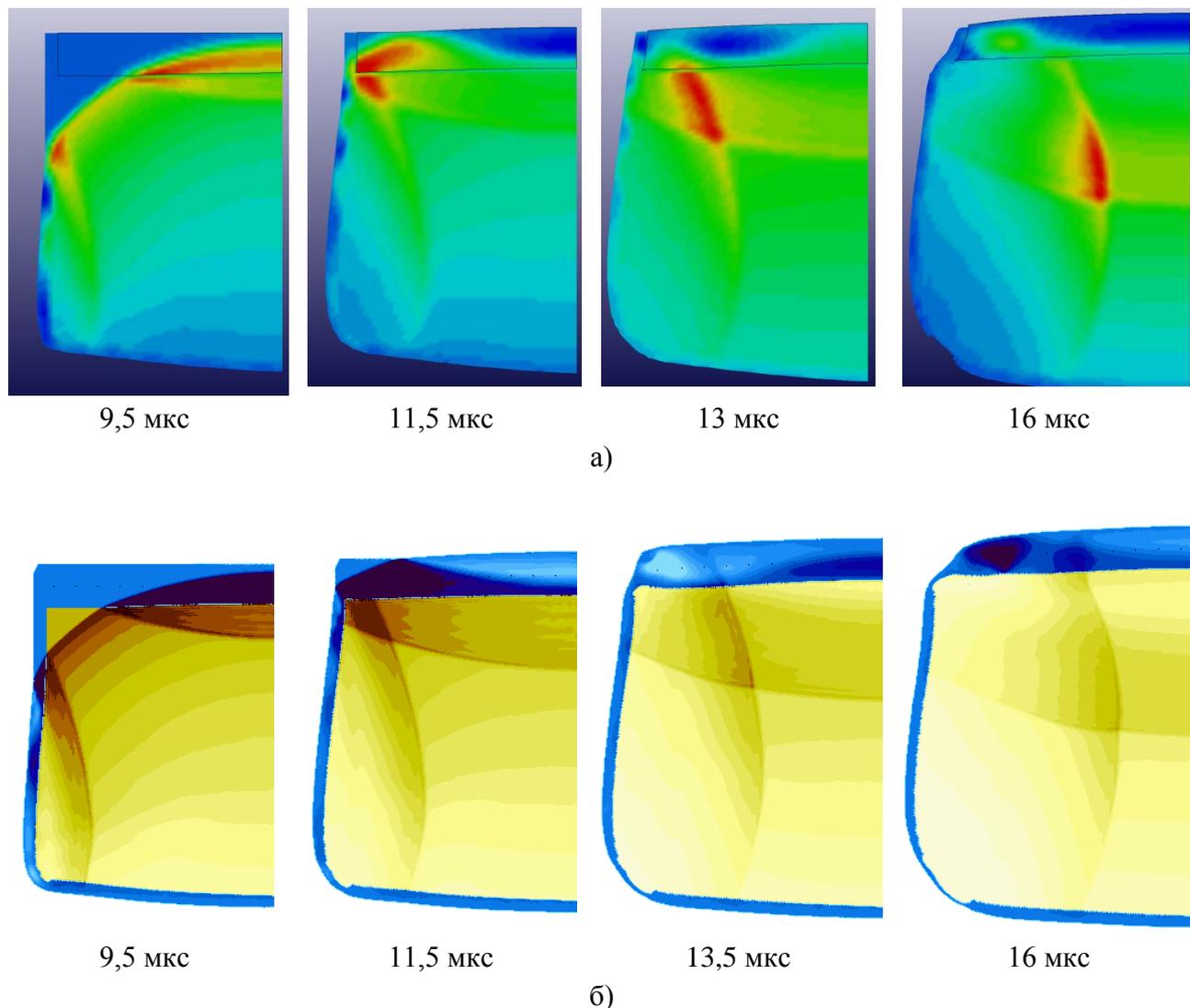


Рис. 2. Кадры компьютерного моделирования процесса взрыва модели СВУ:
а) программа "LS-DYNA", параметр DIREC=1, б) программа "ГЕФАКТ"

На рис. 2а можно увидеть некоторые этапы процесса формирования ударных волн (УВ) сжатия и растяжения как в метаемом диске, корпусе модели СВУ, так и в продуктах детонации. По прошествии 9,5 мкс с момента инициирования детонации заряда ВВ в результате отражения фронта детонационной волны (ДФ) от внутренних поверхностей диска и корпуса СВУ в них формируются ударные волны сжатия. Наиболее отчетливо данную волну можно увидеть в стальном диске, т.к. его толщина более чем в 3 раза больше толщины стенки корпуса модели СВУ. Можно констатировать, что фронт этой волны имеет приблизительно сферическую форму. При подходе к наружной поверхности диска

начинается процесс ее отражения от границы его контакта с воздухом. В результате такого отражения в диске формируется отраженная волна растяжения. Ее фронт начинает двигаться по направлению к внутренней поверхности диска. Очевидно, что она тоже должна иметь сферическую форму, но на рис. 2а (11,5 мкс) видно, что ее форма больше напоминает вид перевернутого колокола.

После прохождения всей толщины диска волна разрежения начинает процесс своего отражения от внутренней поверхности с формированием в нем второй УВ сжатия. Этот момент времени считается временем окончания первой волновой пульсации в метаемом диске [3]. Форма фронта второй ударной волны сжатия в диске еще сильнее отличается от сферической (рис. 2а, 13 мкс). Форма поперечного сечения фронта второй ударной волны разрежения уже больше напоминает трапецию (рис. 2а, 16 мкс).

Если посмотреть на аналогичные кадры численного моделирования процесса взрыва той же конструкции модели СВУ, полученные с помощью другой компьютерной программы – "ГЕФЕСТ" [10], то описанных выше особенностей формирования разных форм фронтов УВ сжатия и растяжения не наблюдается. Фронты УВ обеих волновых пульсаций имеют сферическую форму.

Результаты численного моделирования

Расхождения в решениях задачи полученных с помощью разных компьютерных программ ("LS-DYNA" и "ГЕФЕСТ") можно также увидеть на графиках демонстрирующих поведение значений компонент скорости движения радиальной V_R и осевой V_Z различных областей метаемого диска (рис. 3). Для их построения использовалась информация о поведении узлов лагранжевой конечно-элементной сетки диска (программа "LS-DYNA") и специальных подвижных маркеров [10, 11] (программа "ГЕФЕСТ"), расставленных посередине толщины диска на расстоянии 10, 20, 30, 40 и 45 мм от оси симметрии конструкции.

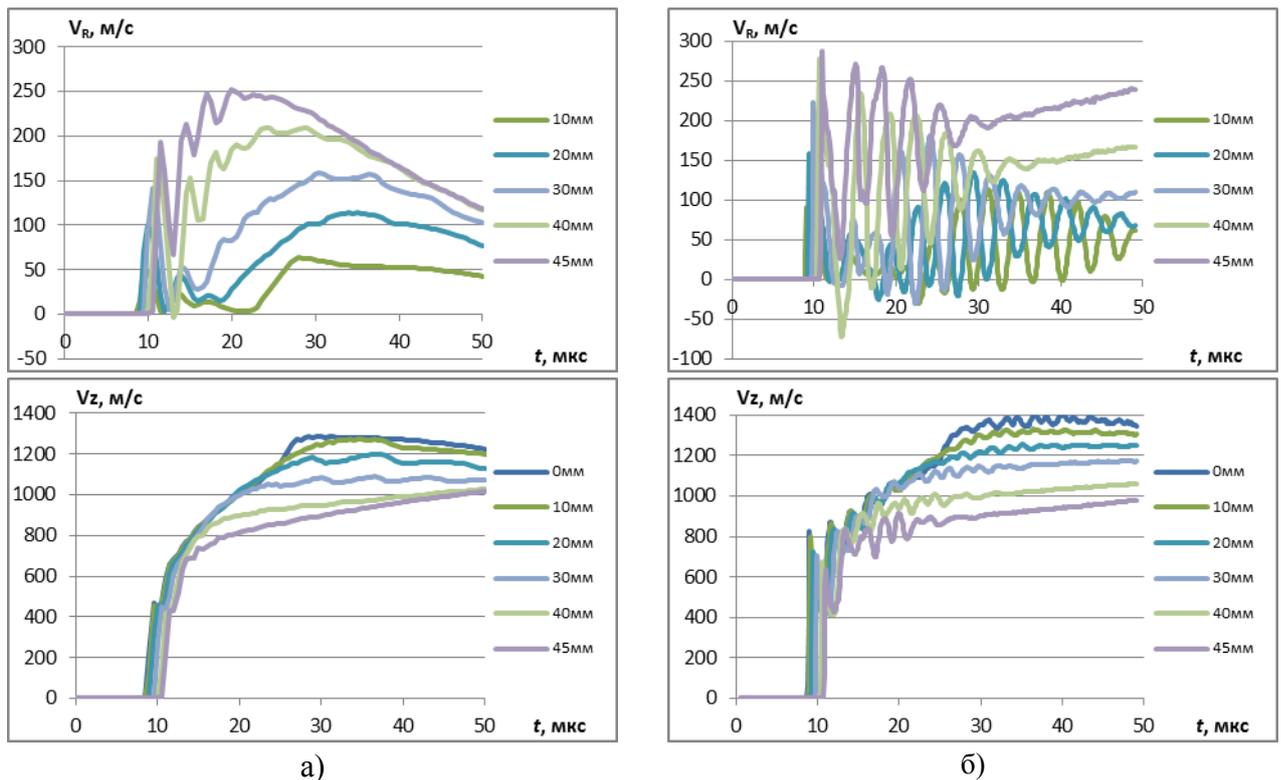


Рис. 3. Изменение радиальной V_R , осевой V_Z компонент скорости движения различных частей диска, метаемого зарядом ВВ высотой 60 мм:
а) программа "LS-DYNA", параметр DIREC=1, б) программа "ГЕФЕСТ"

На рис. 3 видно, что процесс набора значений компонент скорости движения в обоих вариантах моделирования имеет пульсационный характер. Хотя их амплитуда колебаний около среднего значения волновой пульсации сильно отличается. Для радиальной компоненты скорости V_R такое расхождение может достигать 300%. На графиках осевой компоненты скорости V_Z , полученных с помощью программы "LS-DYNA" (рис. 3а), видно, что они имеют практически монотонный возрастающий характер.

Кроме того, обращает на себя внимание поведение данных графиков после 30 мкс. Если для осевой компоненты скорости V_Z значения данного параметра, полученные обеими программами, достигают некоторой стабилизации, то для компоненты V_R значения, полученные с помощью программы "LS-DYNA", не только не стабилизируются, а начинают уменьшаться, особенно у периферийных (наиболее отдаленных от оси симметрии модели СВУ) областей. Такой результат противоречит реальной физике процесса описанный в [12].

Причиной этого, по-видимому, стало то, что заданное в программе "LS-DYNA" условие контакта между ПД и диском не совсем правильно отражает физику процесса их взаимодействия.

Алгоритм программы "ГЕФЕСТ" написан для проведения компьютерного моделирования процесса взрыва различных конструкций в континуальной осесимметричной эйлеровой постановке [11]. Расчет контакта между участвующими в нем средами проводится по методу концентраций [13]. Основой такого метода является принцип коррекции перемещающихся потоков массы контактирующих сред на границах "смешанных" ячеек. Принято, что из "смешанной" ячейки в "чистую" сначала перемещается та среда, которая

находится в "чистой" ячейке. При этом передача нагрузки от среды к среде не может быть ограничено только направлением вектора нормали к поверхности контакта. Это связано с тем, что наличие "смешанных" эйлеровых ячеек не позволяет определить четкую линию такого контакта. Следовательно, данный метод в принципе не требует специального уточнения вида контакта между средами, в отличие от метода лагранжево-эйлерового связывания различных сред, реализованного в программе "LS-DYNA", и передача нагрузки от среды к среде происходит в соответствии с направлением вектора их перемещения.

Кроме того, дополнительным аргументом в пользу критики условия контакта можно привести пример, когда программа "LS-DYNA" не учитывает влияние ударных волн в ПД на процесс метания стального диска.

Как видно на рис. 2 в результате отражения ДФ от внутренних поверхностей корпуса модели СВУ и диска в ПД формируется 2 ударных волны сжатия. Первая волна движется в радиальном направлении к оси симметрии модели СВУ (назовем ее радиальная УВ). Вторая – осевая, которая движется в осевом направлении в сторону донной части корпуса СВУ.

По мере своего продвижения к оси симметрии радиальная УВ скользит вдоль внутренней поверхности диска и, не смотря на более мягкий режим взаимодействия с диском [3], все же должна передать ему часть своей энергии. Однако, если посмотреть на кадр компьютерного моделирования соответствующий моменту времени $t=16$ мкс, полученный с помощью программы "ГЕФЕСТ", то можно увидеть, что результатом такого взаимодействия в диске возникает область повышенного давления примыкающая к месту контакта УВ с поверхностью диска (рис. 2б). В тоже время на рис. 2а (16 мкс) такой области нет. Как раз наоборот. На это место распространила свое влияние УВ растяжения в виде обширной области растягивающих усилий. Этот эффект тоже можно объяснить особенностью задания условия контакта между ПД и диском в программе "LS-DYNA", когда передача усилия на поверхность метаемого диска происходит только в направлении вектора нормали к ней. В связи с тем, что радиальная УВ в ПД является скользящей, то ее влияние на диск практически отсутствует.

Внесение изменений в математическую модель СВУ

Одним из способов проверить правильность высказанного предположения объясняющего причины появления противоречивых результатов полученных разными программами для одной и той же задачи, могло бы стать проведение дополнительного моделирования процесса взрыва модели СВУ с использованием континуальной осесимметричной эйлеровой постановки в программе "LS-DYNA", которая используется в программе "ГЕФЕСТ". К сожалению, такая проверка оказалась невозможной по причине того, что такой подход в программе "LS-DYNA" не реализован [8].

Тогда, несмотря на рекомендации по настройке команды лагранжево-эйлерового связывания разных сред *CONSTRAINED_LAGRANGE_IN_SOLID [8] было принято решение установить значение параметра DIREC=3. Такое значение соответствует передачи нагрузки от ПД на стальной диск во всех направлениях, т.е. как в направлении вектора нормали к поверхности диска, так и вдоль нее. Соответствующие кадры компьютерного моделирования процесса взрыва модели СВУ и зависимости описывающие изменение значений компонент скорости движения радиальной V_R и осевой V_Z различных областей метаемого диска показаны на рис. 4 и рис. 5.

Оценка правильности внесения изменений в модель СВУ

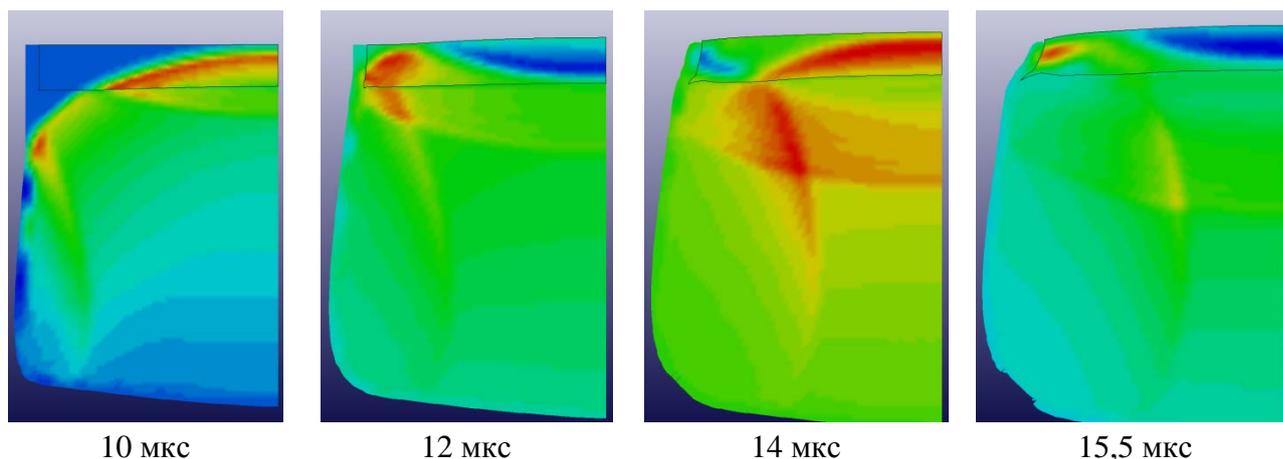
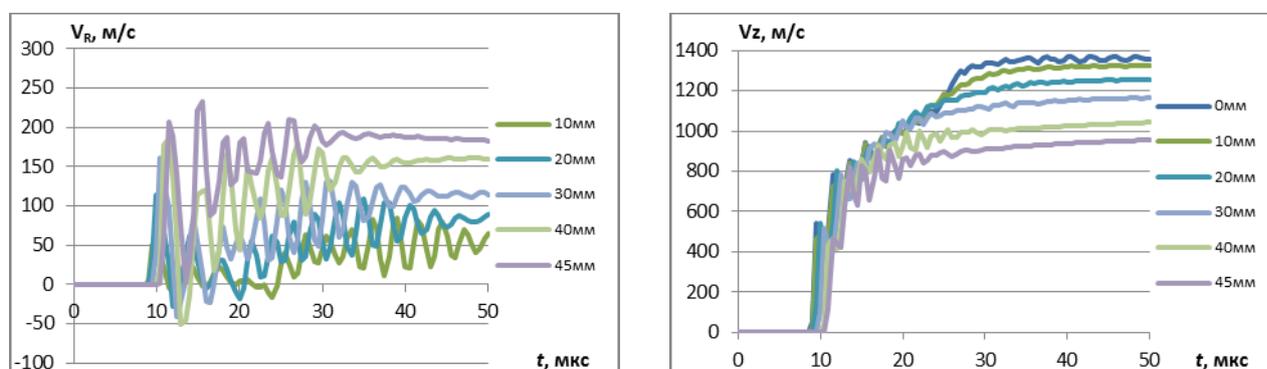


Рис. 4. Кадры компьютерного моделирования процесса взрыва модели СВУ ("LS-DYNA", параметр DIREC=3).



Представленные на рис. 4 кадры компьютерного моделирования являются идентичными аналогичным кадрам, полученным с помощью программы "ГЕФЕСТ" (рис. 2б). Фронты ударных волн сжатия и растяжения обеих пульсаций теперь также имеют сферическую форму. На момент $t=16$ мкс распространение влияния в диске области растягивающих усилий существенно уменьшилось и на освободившемся месте, также как и в программе "ГЕФЕСТ", сформировалась область повышенного давления.

В свою очередь графики, изображенные на рис. 5, также подтверждают тот факт, что использование условия контакта между ПД и диском в программе "LS-DYNA" с новым значением параметра DIREC=3 делает их практически идентичными аналогичным графикам, полученными с помощью программы "ГЕФЕСТ". Некоторое уменьшение абсолютных значений радиальной компоненты скорости движения различных частей диска связаны с тем, что из-за ограниченных компьютерных ресурсов, размер конечного элемента в трехмерной постановке был взят несколько больше размера элемента в упрощенной осесимметричной постановке. Это сделало расчет несколько грубее.

Тогда возникает логичный вопрос о необходимости использования программы "LS-DYNA" для проведения компьютерного моделирования процесса взрыва модели СВУ определенной конструктивной схемы (рис. 1) учитывая все сложности ее настройки, если

программа "ГЕФЕСТ" довольно легко и просто справляется с поставленной задачей. Аргументом в пользу программы "LS-DYNA" можно привести то, что программа "ГЕФЕСТ" написана для проведения моделирования процесса взрывного взаимодействия только двух сред – металла корпуса и газа (ПД). Если возникнет необходимость исследовать процесс взрывного метания, например, 2х и более дисков или набора готовых поражающих элементов, то программа "ГЕФЕСТ" для этих целей не подходит.

Как указывалось выше, информация о величине скорости движения центра масс метаемого взрывом диска и отдельных его частей для проведения качественной взрыво-технической экспертизы является не полной. Также необходимо знать значение величины угловой ширины осколочного поля СВУ (меридионального угла разлета осколков – "набора металлических частиц").

Для его определения можно воспользоваться формулой:

$$\varphi = \arctg\left(\frac{V_R}{V_Z}\right),$$

где V_R , V_Z – радиальная и осевая компоненты скорости движения части осколочного диска.

Изменения значений меридионального угла разлета φ различных частей метаемого взрывом диска, полученных с использованием задания двух вариантов контакта между ПД и диском в программе "LS-DYNA", представлены на рис. 6.

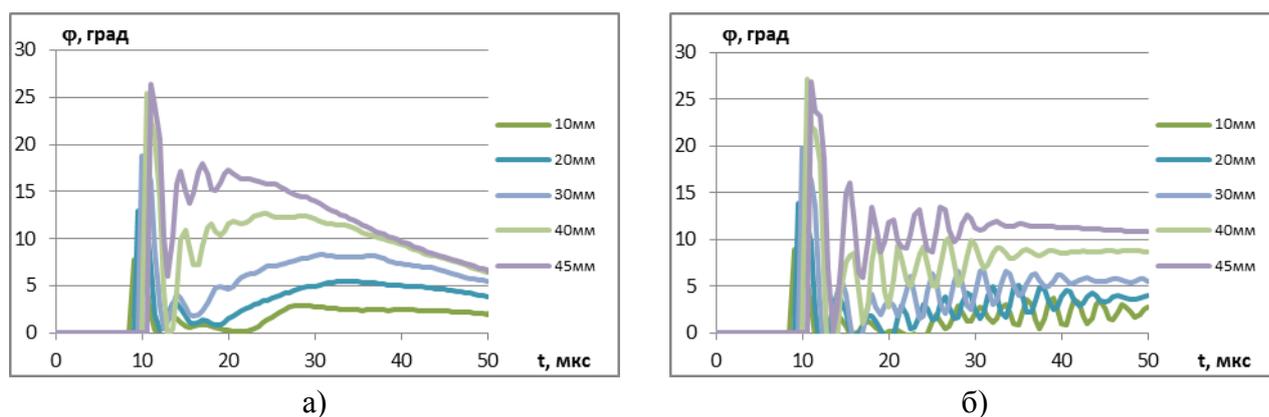


Рис. 6. Изменение значений меридионального угла разлета φ различных частей диска "набора металлических частиц", метаемого зарядом ВВ высотой 60 мм (программа "LS-DYNA"): а) параметр DIREC=1, б) параметр DIREC=3.

Как и следовало ожидать, описанные отличия в поведении УВ внутри метаемого взрывом диска автоматически отразились и на поведении значений угла разлета φ .

Итоговое значение угла φ разлета основной массы стального диска "набора металлических частиц" определялось с помощью методики [14].

Влияние высоты заряда ВВ на значение угла разлета осколков СВУ

Проведя серию расчетов для моделей СВУ, у которых значение высоты заряда ВВ изменялось в диапазоне $H=10\dots300$ мм, были получены зависимости между данной высотой H и меридиональным углом разлета φ 90% массы метаемого диска "набора металлических частиц" (рис. 7). Эти зависимости были получены на основе информации о поведении узла

лагранжевой КЭС диска (программа "LS-DYNA") и подвижного маркера, размещенного внутри эйлеровой неподвижной расчетной сетке (программа "ГЕФЕСТ"), расположенных по середине его толщины на расстоянии 45 мм от оси симметрии.

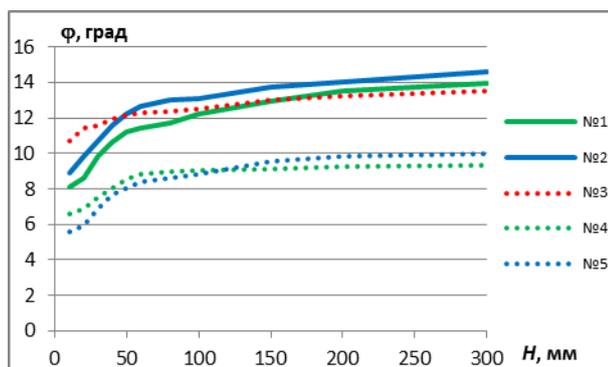


Рис. 7. Зависимость между величиной меридионального угла разлета φ массы стального диска "набора металлических частиц" и высотой H заряда ВВ:
 №1 – "LS-DYNA", DIREC=3, узел КЭС на расстоянии 45 мм;
 №2 – "ГЕФЕСТ", маркер на расстоянии 45 мм;
 №3 – "LS-DYNA", DIREC=1, узел КЭС на расстоянии 40 мм;
 №4 – "LS-DYNA", DIREC=3, узел КЭС на расстоянии 40 мм;
 №5 – "ГЕФЕСТ", маркер на расстоянии 40 мм

На рис. 7 видно, что зависимости, полученные с помощью программы "ГЕФЕСТ" и "LS-DYNA", у которой значение параметра контакта между средами было принято равным DIREC=3, практически одинаковые.

Построение аналогичной зависимости с помощью программы "LS-DYNA" с параметром контакта DIREC=1 показало, что кривой, которая наилучшим образом согласуется с двумя предыдущими является та, которая соответствует поведению узла КЭС расположенного на расстоянии не 45 мм, а 40 мм от оси симметрии (рис. 7).

Данный узел отвечает за поведение уже не 90% а 80% массы диска и данная кривая имеет сильно завышенные значения функции φ в области малых значений высоты H , и заниженные – в области высоких. Такое поведение функции $\varphi(H)$ склоняет к мысли о том, что для рассматриваемой конструкции модели СВУ отсутствует влияние высоты заряда ВВ H на величину меридионального угла разлета φ . Независимо от значения H угол φ имеет практически постоянное значение.

Однако такой вывод нельзя сделать, если проанализировать поведение 2х других зависимостей. Все они являются монотонно возрастающими. Наиболее резкое увеличение значения угла φ наблюдается в диапазоне $H=10...100$ мм, а более плавное – $H=100...300$ мм. Такое поведение функции $\varphi(H)$ можно объяснить тем, что по мере увеличения значения высоты H ДФ подходит к метаемому диску "набору металлических частиц", форма которого постепенно трансформируется из сферичной в плоскую. С такой формой ДФ уже не так сильно влияет на значение радиальной компоненты скорости движения периферийных областей диска.

Также на рис. 7 были дополнительно нанесены 2 линии (№ 4, № 5). Эти линии были построены на основании информации о поведении узлов КЭС диска ("LS-DYNA", DIREC=3) и специальных подвижных маркеров ("ГЕФЕСТ") расположенных на расстоянии 40 мм от

оси симметрии. Значения угла φ , которые соответствуют этим графикам, очень близки друг к другу, однако они на 30% меньше значений полученных для маркеров и узлов КЭС расположенных на расстоянии 45 мм (линии № 1, № 2). Это делает невозможным их использование для правильного определения значения угла разлета φ основной массы метаемого диска – "набора металлических частиц".

Располагая дискретной расчетной информацией можно провести поиск аналитической линии регрессии, которая наилучшим образом будет описывать результаты численного моделирования. Для этого можно воспользоваться методом наименьших квадратов (табл. 1).

Таблица 1. Функциональные зависимости, описывающие связь между величиной меридионального угла разлета φ (град.) и высотой заряда ВВ H (мм).

Компьютерная программа	Линия регрессии	Величина достоверности аппроксимации R^2
LS-DYNA	$\varphi = 1,84 \cdot \ln(H) + 3,7$	0,9825
ГЕФЕСТ	$\varphi = 1,73 \cdot \ln(H) + 5,1$	0,9722

Заключение

По результатам проведенных исследований можно сделать такие выводы:

1. Для определения величины меридионального угла разлета φ набора стальных частиц, метаемого взрывом с торцевой поверхности закрытого цилиндрического заряда ВВ, значение параметра DIREC в команде *CONSTRAINED_LAGRANGE_IN_SOLID лагранжево-эйлерового связывания контактирующих сред в программе "LS-DYNA" должно быть равным 3.
2. Для определения величины φ значение параметра DIREC также можно принимать равным 1, как это рекомендуют разработчики программы "LS-DYNA", но только в диапазоне значений высоты заряда $H=50...150$ мм (0,5...1,5 клб).
3. Функциональная зависимость описывающая связь между величиной меридионального угла разлета φ набора стальных частиц метаемого взрывом и высотой H цилиндрического заряда ВВ имеет вид $\varphi = A \cdot \ln(H) + B$.

Список литературы

1. Прохоров-Лукин Г.В., Пашенко В.И., Биков В.И. та ін. Методика комплексного дослідження вибухових пристроїв, вибухових речовин і слідів вибуху. К.: МЮ України, МВС України, 2007. 218 с.
2. Комиссионная комплексная взрыво-пожарно-техническая экспертиза по взрыву в жилом доме № 67 по ул. Некрасова в г. Евпатории Автономной республики Крым от 16.02.2009 года № 4/19-8/1. Симферополь: ДНДЕКЦ МВС України. 68 с.
3. Андреев С.Г., Бабкин А.В., Баум Ф.А., Имховик Н.А., Кобылкин И.Ф., Колпаков В.И., Ладов С.В., Одинцов В.А., Орленко Л.П., Охитин В.Н., Селиванов В.В., Соловьев В.С., Станюкович К.П., Челышев В.П., Шехтер Б.И. Физика взрыва. В 2 т. Т.1. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. 832 с.

4. Dobratz B.M., Crawford P.C. LLNL Explosive Handbook. Properties of Chemical Explosives and Explosive Simulants. USA, California, Livermore, University of California, Lawrence Livermore National Laboratory, 1985. 541 p.
5. Муйземнек А.Ю., Богач А.А. Математическое моделирование процессов удара и взрыва в программе LS-DYNA: учеб. пособие. Пенза: Информационно-издательский центр ПГУ, 2005. 106 с.
6. Бабкин А.В., Колпаков В.И., Охитин В.Н., Селиванов В.В. Численные методы в задачах физики взрыва и удара: учебник для вузов. Т. 3 / Под ред. В.В. Селиванова. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000. 516 с.
7. Рудаков К.М. Чисельні методи аналізу в динаміці та міцності конструкцій: Навч. посібник. К.: НТУУ "КПІ", 2007. 379 с.
8. LS-DYNA 971. Keyword user's manual. Livermore software technology corporation (LSTC). Vol. 1, 2007. 2206 p.
9. Сидоренко Ю.М. К вопросу о влиянии разрушения корпуса осколочно-фугасного снаряда на процесс формирования осколочного поля // Артиллерийское стрелковое вооружение. Киев: НТЦ АСВ, 2009. № 2. С. 24-30.
10. Сидоренко Ю.М. Методика двумерного компьютерного моделирования процессов функционирования осколочно-фугасных боеприпасов // Артиллерийское стрелковое вооружение. Киев: НТЦ АСВ, 2005. № 1. С. 18-21.
11. Колпаков В.И., Ладов С.В., Рубцов А.А. Математическое моделирование функционирования кумулятивных зарядов: метод. указания. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1998. 36 с.
12. Сидоренко Ю.М. Особенности процесса взрыва боеприпаса с осевым осколочным полем // Артиллерийское и стрелковое вооружение. Киев: НТЦ АСВ, 2006. № 4. С. 9-15.
13. Бахрах С.М., Глаголева Ю.П., Самигулин М.М., Фролов В.Д., Яненко Н.Н., Янилкин Ю.В. Расчет газодинамических течений на основе метода концентраций // Докл. АН СССР. 1981. Т. 257, № 3. С. 566-569.
14. Сидоренко Ю.М. Особенности определения параметров зоны поражения осколочно-пучкового боеприпаса // Артиллерийское и стрелковое вооружение. Киев: НТЦ АСВ, 2007. № 4. С. 38-45.

Influence of contact between detonation products and a metal disk by the value of its meridional opening angle

08, August 2013

DOI: 10.7463/0813.0602548

Sidorenko Yu.M.

National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute»

yura_michael@ukr.net

Problems and solutions arising during creation of a mathematical finite element model of home-made explosive devices (HEDs) were described. The distinct feature of this model is that it relies on the Lagrangian and Eulerian approaches in order to describe the expansion of the explosive charge's detonation products and deformation of HEDs' metal parts. The author determined influence of the type of mathematical contact between interactive media on the accuracy of values of the colatitude opening angle of fragments (fragmentation field), which are formed as a result of an explosion of the HED. The obtained results could be useful for criminalists and help them to carry out a comprehensive judicial technical expertise of HEDs' explosion.

Publications with keywords: [expertise](#), [explosion](#), [LS-DYNA](#), [modelling](#), [high explosive](#), [products of detonation](#), [improvised explosive device](#), [opening angle](#)

Publications with words: [expertise](#), [explosion](#), [LS-DYNA](#), [modelling](#), [high explosive](#), [products of detonation](#), [improvised explosive device](#), [opening angle](#)

References

1. Prokhorov-Lukin G.V., Pashchenko V.I., Bikov V.I., et al. *Metodika kompleksnogo doslidzhennya vibukhovikh pristroiv, vibukhovikh rechovin i slidiv vibukhu* [Method of complex research of explosive devices, explosives and traces of explosion]. Kiev, Publication of Minister of Internal Affairs of Ukraine, 2007. 218 p. (in Ukrainian).
2. *Komissionnaya kompleksnaya vzryvo-pozharno-tekhnicheskaya ekspertiza po vzryvu v zhilom dome № 67 po ul. Nekrasova v g. Evpatorii Avtonomnoy respubliki Krym ot 16.02.2009 goda № 4/19-8/1* [Commissional comprehensive explosion-fire-technical examination of the explosion in an apartment house No. 67 at Nekrasova street, Evpatoria, Autonomous Republic of Crimea dated 16.02.2009 No. 4/19-8/1]. Simferopol', Publication of Minister of Internal Affairs of Ukraine, 2009. 68 p.

3. Andreev S.G., Babkin A.V., Baum F.A., Imkhovik N.A., Kobylkin I.F., Kolpakov V.I., Ladov S.V., Odintsov V.A., Orlenko L.P., Okhitin V.N., Selivanov V.V., Solov'ev B.C., Stanyukovich K.P., Chelyshev V.P., Shekhter B.I. *Fizika vzryva. V 2 t. T. 1* [Physics of explosion. In 2 vols. Vol.1]. Moscow, Fizmatlit, 2004. 832 p.
4. Dobratz B.M., Crawford P.C. *LLNL Explosive Handbook. Properties of Chemical Explosives and Explosive Simulants*. USA, California, Livermore, University of California, Lawrence Livermore National Laboratory, 1985. 541 p.
5. Muyzemnek A.Yu., Bogach A.A. *Matematicheskoe modelirovanie protsessov udara i vzryva v programme LS-DYNA* [Mathematical modeling of shock and explosion in the program LS-DYNA]. Penza, PSU Publ., 2005. 106 p.
6. Babkin A.V., Kolpakov V.I., Okhitin V.N., Selivanov V.V. *Chislennyye metody v zadachakh fiziki vzryva i udara. T. 3* [Numerical methods in problems of physics of explosion and shock. Vol. 3]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2000. 516 p.
7. Rudakov K.M. *Chisel'ni metodi analizu v dinamitsi ta mitsnosti konstruktsiy* [Numerical methods for the analysis of the dynamics and strength of structures]. Kiev, NTUU "KPI" Publ., 2007. 379 p. (in Ukrainian).
8. *LS-DYNA 971. Keyword user's manual. Livermore software technology corporation (LSTC). Vol. 1*, 2007. 2206 p.
9. Sidorenko Yu.M. K voprosu o vliyanii razrusheniya korpusa oskolochno-fugasnogo snaryada na protsess formirovaniya oskolochnogo polya [On issue of influence of high-explosive shell body destruction on process of fragment field formation]. *Artilleriyskoe strelkovoe vooruzhenie*. Kiev, NTTs ASV Publ., 2009, no. 2, pp. 24-30.
10. Sidorenko Yu.M. Metodika dvumernogo komp'yuternogo modelirovaniya protsessov funktsionirovaniya oskolochno-fugasnykh boepripasov [The technique of two-dimensional computer simulation of processes of functioning of fragmentation-and-high-explosive munitions]. *Artilleriyskoe strelkovoe vooruzhenie*. Kiev, NTTs ASV Publ., 2005, no. 1, pp. 18-21.
11. Kolpakov V.I., Ladov S.V., Rubtsov A.A. *Matematicheskoe modelirovanie funktsionirovaniya kumulyativnykh zaryadov* [Mathematical modeling of the functioning of shaped charges]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 1998. 36 p.
12. Sidorenko Yu.M. Osobennosti protsessa vzryva boepripasa s osevim oskolochnym polem [Features of the explosion of ammunition with an axial fragmentation field]. *Artilleriyskoe i strelkovoe vooruzhenie*. Kiev, NTTs ASV Publ., 2006, no. 4, pp. 9-15.
13. Bakhrakh S.M., Glagoleva Yu.P., Samigulin M.M., Frolov V.D., Yanenko N.N., Yanilkin Yu.V. Raschet gazodinamicheskikh techeniy na osnove metoda kontsentratsiy [Calculation of gas-dynamic flows on basis of method of concentrations]. *Dokl. AN SSSR*, 1981, vol. 257, no. 3, pp. 566-569.
14. Sidorenko Yu.M. Osobennosti opredeleniya parametrov zony porazheniya oskolochno-puchkovogo boepripasa [Features of determining the parameters of zone of defeat of the fragmentation-beam munition]. *Artilleriyskoe i strelkovoe vooruzhenie*. Kiev, NTTs ASV Publ., 2007, no. 4, pp. 38-45.