

УСТРОЙСТВО И РЕАЛИЗАЦИЯ ГЕНЕРАТОРА ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ФРАГМЕНТА, ФОРМИРУЕМОГО ВЗРЫВОМ

Ц.-Л. Тэн¹, И.-А. Чу², Ф.-А. Чан³, Б.-Ч. Шень⁴

¹Отделение прикладной механики, Университет Да-Е, Да-Цуень, провинция Чанхуа 515, Тайвань, Китайская республика, tleng@mail.dyu.edu.tw

²Институт науки и технологии Чунь-Шаня, Лунь-Тань, провинция Тао-Юань 325, Тайвань, Китайская республика

³Отделение гражданского строительства, Технологический институт Чунь-Шаня, Национальный университет обороны, Та-Ши, провинция Тао-Юань 335, Тайвань, Китайская республика

⁴Школа оборонных наук (военная школа), Технологический институт Чунь-Шаня, Национальный университет обороны, Та-Ши, провинция Тао-Юань 335, Тайвань, Китайская республика

Описано взрывное устройство для формирования высокоскоростного фрагмента, позволяющее в полевых условиях имитировать кинетический удар по модели тактической ракеты. Формируемый фрагмент из железа имеет массу около 45 г и скорость 2500 м/с. Для оптимизации параметров формы метаемой оболочки выполнено численное моделирование детонации взрывного устройства и формирования фрагмента с использованием трехмерного метода конечных элементов, реализованного в программе LS-DYNA3D. Для подтверждения результатов предварительного расчета проведены опыты по определению скорости и массы формируемых фрагментов. Для измерения формы и скорости фрагмента использована техника импульсного рентгенографирования. Разработанный генератор фрагментов, формируемых взрывом, может быть использован для проверки эффективности антиракетного оружия. Он также полезен при исследовании стойкости военных сооружений и герметичности строений атомных станций при их ударном поражении.

Ключевые слова: генератор высокоскоростной пули, формируемый взрывом фрагмент, внедрение.

ВВЕДЕНИЕ

Современные методы ускорения, такие как двух- и трехступенчатые легкогазовые пушки, плазменные ускорители и кумулятивные заряды, широко используются в исследованиях по высокоскоростному удару [1]. Большинство металлических фрагментов, генерируемых кумулятивными зарядами, могут быть сгруппированы в два типа: струи и ударные ядра. При разработке антиракетного оружия и его тестировании необходимо в экспериментах на земле

исследовать эффективность поражающего действия фрагмента или фрагментов при их взаимодействии с эквивалентом тактической баллистической ракеты (ТБР), прежде чем будет выполнен реальный эксперимент по перехвату ракеты в полете. Скорость фрагментов традиционного оружия, связанного с применением взрыва, составляет 1000 ÷ 2000 м/с, что существенно меньше скорости фрагмента относительно ТБР в реальных условиях. Поэтому при выполнении полевых тестов в качестве альтернативного способа ускорения фрагмента, или ударного ядра, до скорости ≈2500 м/с используется взрывной генератор. При его разработке использована концепция снаряда, формируемого взрывом (СФВ). В рамках этого подхода возможно получение компактного фрагмента массой от нескольких до сотен граммов со скоростью более 2500 м/с, удовлетворяющего требованиям полевых испытаний. Другая причина выбора этой концепции как решения — существенно более низкая стоимость устройства по сравнению, например, с легкогазовыми

Tso-Liang Teng¹, Yi-An Chu², Fwu-An Chang³, Bor-Cherng Shen⁴.

¹Department of Mechanical Engineering, Da-Yeh University, Da-Tsuen, Changhua 515, Taiwan, R.O.C.

²Chung-Shan Institute of Science and Technology, Lung-Tan, Tao-Yuan 325, Taiwan, R.O.C.

³Department of Civil Engineering, Chung Cheng Institute of Technology, National Defense University, Ta-Shi, Tao-Yuan 335, Taiwan, R.O.C.

⁴School of Defense Science, Chung Cheng Institute of Technology, National Defense University, Ta-Shi, Tao-Yuan 335, Taiwan, R.O.C.

пушками. СФВ-устройство можно точнее ориентировать при прицеливании на мишень, чем в случае, когда для формирования фрагментов взрывом используется традиционное оружие с применением взрывчатого вещества (ВВ).

Концепция ударного ядра, формируемого взрывом, не нова. Р. В. Вуд впервые продемонстрировал подобное устройство [2]. Он ставил опыты с детонаторами, которые имели полую выемку в ВВ. Полость на конце детонатора была облицована медным лайнером (оболочкой). При детонации ВВ оболочку сжимало в компактное ядро (фрагмент), двигающуюся с высокой скоростью. Это явление известно как эффект Мишни — Шардин. Пули, формируемые из равнотолщинной толстой оболочки, применяются в конструкции противотанковых мин. Однако фрагменты, формируемые из лайнера постоянной толщины, не эффективны в тех случаях, когда требуется пробитие на больших дистанциях. В [3] исследовались широкоугольные конические клинообразные лайнеры, называемые Р-зарядами (снарядообразующие заряды). Р-заряд формирует компактный фрагмент, который может стабильно лететь на большие дистанции и атаковать бронированную цель. В работе [4] предложена теория формирования струи из зарядов с конической выемкой, облицованной металлом, так называемая PER-теория, которая широко применяется для расчета кумулятивных устройств и позволяет оценить контуры и скорость формируемых элементов. Автор работы [5] применил PER-теорию при разработке кода BASC для Исследовательской баллистической лаборатории армии США. BASC является важным средством при конструировании и анализе кумулятивных устройств. Впоследствии гидродинамический метод конечных элементов был также использован для численного анализа формирования взрывом фрагментов. Код DYNA2D [6], разработанный в Ливерморской национальной лаборатории им. Лоуренса, часто применялся для моделирования кумулятивного заряда и СФВ-устройств. Другие компьютерные коды, такие как PISCES-2DELK [7], AUTODYN [8], MSC-DYTRAN [9] и LS-DYNA3D [10], также успешно использовались для моделирования и анализа СФВ-устройств. Компьютерное моделирование не только увеличило эффективность разработки этих устройств, но и свело к минимуму число экспериментов, требуемых при их разработке. Для определения формы и скорости

СФВ-фрагментов в экспериментах обычно применяется техника импульсного рентгенографирования [11]. В работе [12] использовалась высокоскоростная камера с частотой съемки до 2 млн кадров в секунду, а также техника синхронизации в режиме фоторегистратора для наблюдения процесса формирования фрагмента и исследования влияния качества механической обработки лайнера на возмущения, развивающиеся при формировании СФВ.

В данной статье разработан генератор высокоскоростного ударного ядра, формируемого взрывом, предназначенный для использования в полевых испытаниях, в которых эквивалентный фрагмент ударяет по эквиваленту ТБР. Масса сформированного ядра около 45 г, ее скорость около 2500 м/с. При испытаниях внедрение фрагмента может привести к детонации или дефлаграции ВВ, содержащегося в эквиваленте ТБР. При использовании однократного СФВ-генератора нет необходимости защищать ускоритель от продуктов взрыва модели эквивалента ТБР. Для оптимизации параметров формируемого элемента детонация СФВ-устройства и формирование ударного ядра численно моделировались при помощи программного комплекса LS-DYNA3D, основанного на методе конечных элементов. Выполнены опыты с СФВ-генератором, чтобы подтвердить предварительную конструкцию и оценить параметры ядра. Для измерения формы и скорости СФВ-фрагмента использована техника импульсного рентгенографирования.

ГЕНЕРАТОР ВЫСОКОСКОРОСТНОГО СНАРЯДА

На протяжении последних десятилетий основные усилия исследователей в области кумуляции были сосредоточены на конструировании оружия для пробития брони. Возрастающие требования к этой технологии определялись военными и гражданскими применениями, широко исследовалось пробивание неметаллических мишеней, таких как цемент, горные породы и др. Фрагменты, формируемые взрывом, похожи на кумулятивные заряды, но являются скорее ядрами, чем струями. Их действие на больших дистанциях, большая масса и высокая кинетическая энергия делают их полезными для приложений, где требуется дальное действие и разрушение строительных конструкций. Цель этого исследования — получить высокоскоростной фрагмент массой 45 г и ско-

ростью около 2500 м/с, подобрав подходящую комбинацию ВВ и металлического лайнера.

Формируемый взрывом фрагмент называется также пенетратором, самоформирующимся фрагментом, зарядом Мишни — Шардин, устройством для фокусирования массы или Р-зарядом. Типичное СФВ-устройство состоит из металлического лайнера, металлической оболочки, заряда ВВ и детонатора [13]. Часто используется стопорное кольцо, поддерживающее компоновочный узел лайнер/ВВ в нужной позиции. Взрывчатыми веществами служат составы с высокой скоростью детонации, такие как состав В, октол, гексоген, октоген или пластические ВВ. После детонации продукты взрыва создают высокое давление, которое ускоряет лайнер с одновременным его обжатием в компактный фрагмент или в другую желаемую форму. Устройство, формирующее взрывом ядро, подобно кумулятивному заряду, за исключением лайнера, который имеет форму не конуса, а скорее блюдца.

Конструкция СФВ-устройства характеризуется множеством параметров, которые влияют на характеристики формируемого ядра. Некоторые из них определяют физические характеристики ВВ, лайнера и материала окружающей оболочки. Другие параметры — геометрические, характеризуют размеры и форму лайнера, заряда ВВ и пр. Успешное конструирование СФВ-устройства достигается с использованием параметров, которые позволяют получить фрагмент, способный разрушить заданную структуру. К таким определяющим параметрам относятся высота заряда ВВ, толщина лайнера в центре, профиль верхней поверхности лайнера и профиль его нижней поверхности.

Высотой заряда считается расстояние между нижней точкой поверхности лайнера и нижним торцом ВВ (рис. 1,а). Она должна быть такой, чтобы обеспечить запас энергии ВВ, необходимый для схлопывания лайнера, т. е. быть достаточно большой, чтобы сформировавшаяся детонационная волна достигала всей нижней поверхности лайнера до того, как он схлопнется. При малой высоте заряда фронт детонационной волны будет сильно искривлен и схлопывание лайнера может быть неравномерным. Обычно увеличение высоты заряда сверх 1.5 диаметров заряда приводит к незначительному улучшению пробивной способности кумулятивного заряда [14]. В СФВ-

устройстве выбор высоты заряда ВВ определяется необходимыми массой и скоростью фрагмента. Обычно находится решение, удовлетворяющее требованиям минимизации массогабаритных характеристик.

Тип ВВ также очень важен, поскольку определяет энергию ВВ; широко используются и литые, и прессованные ВВ. Но в любом случае должны быть приняты меры для обеспечения однородности ВВ. В этой работе использован литой состав октол (октоген/тритил 75/25), для которого без труда можно получить однородные отливки высокого качества.

Пластичность и прочность материала лайнера и качество его обработки влияют на формирование пули. Обычно используются лайнеры из меди или железа ввиду высокой пластичности этих материалов.

Существует несколько подходов к формированию ударного ядра конкретной формы. В одном из них используется перегибание, «складывание» периферийной части лайнера, его ободка, вперед или назад относительно центра лайнера. Каждая из этих форм может быть получена при соответствующих контурах лайнера и конфигурации ВВ. Тип устройства зависит от конкретного приложения. «Складывающиеся вперед» лайнеры позволяют получать обычно более длинные СФВ, чем лайнеры, «сложенные назад», и соответственно имеют более высокую пробивную способность. Однако градиент скорости по длине фрагмента приводит, как правило, к его разрушению на несколько фрагментов, что ограничивает его дальное действие. Лайнеры, «складывающиеся назад», дают фрагмент с лучшими аэродинамическими характеристиками. Большинство приложений СФВ-технологии требуют дального действия и глубокого внедрения в поражаемую структуру, поэтому исследования выполнялись в основном с лайнерами, «складывающимися назад». В этой работе использован лайнер из чистого железа ввиду пластичности материала оболочки и близости плотности железа к плотности стальных фрагментов в боеголовках. «Складывающийся назад» лайнер был выбран заранее, чтобы соответствовать требованиям по энергии внедрения снаряда.

Конструктивные параметры лайнера (толщина в центре, профили верхней и нижней поверхностей лайнера) определяют форму образующегося ударного фрагмента. Обычно для

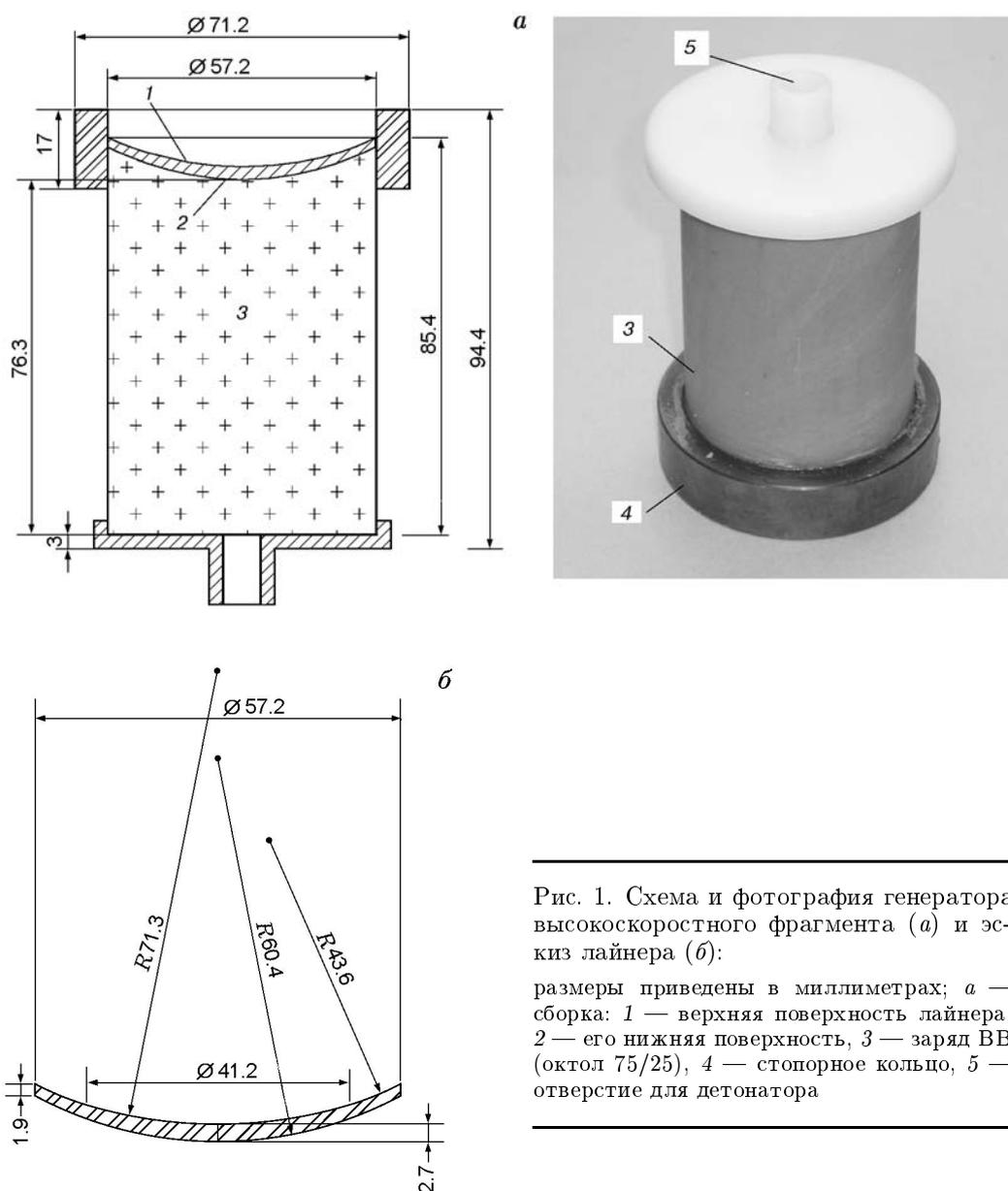


Рис. 1. Схема и фотография генератора высокоскоростного фрагмента (а) и эскиз лайнера (б):

размеры приведены в миллиметрах; а — сборка: 1 — верхняя поверхность лайнера, 2 — его нижняя поверхность, 3 — заряд ВВ (октол 75/25), 4 — стопорное кольцо, 5 — отверстие для детонатора

задания формы верхней поверхности лайнера используется более двух радиусов кривизны. Изменение геометрии верхней поверхности лайнера относительно нижней изменяет распределение массы и прочности лайнера по его радиусу, влияя на вероятность разрушения лайнера на множество кусочков на ранней стадии формирования, а также на профиль лайнера на поздней стадии формирования. И, безусловно, должны быть обеспечены плотный контакт между ВВ и лайнером и высокая симметрия конструкции в целом, для того чтобы не допустить прерываний детонационной

волны и асимметрии взрывного импульса.

Обычно оптимальная конструкция СФВ-устройства является результатом многочисленных экспериментов. Поэтому СФВ-устройства часто конструируются с использованием предварительного численного моделирования. Этот подход позволяет конструктору до проведения экспериментов понять механизм формирования ядра на разных стадиях процесса и свести задачу к исследованию влияния ограниченного числа параметров. В данной работе конструктивные параметры лайнера определялись численным моделированием.

Таблица 1

Свойства материалов и ВВ и константы уравнения состояния,
используемые при численном моделировании СФВ

Материал	Свойства материалов				Постоянные уравнений состояния						
	m , г	ρ , г/см ³	Y , Мбар	σ , Кбар	C , см/мкс	S_1	Коэффициент Грюнайзена				
Лайнер											
Железо	45	7.87	0.74	6.7	0.457	1.49	2.169				
Охранное кольцо											
Сталь	186	7.9	0.77	7.0	0.457	1.49	2.169				
Взрывчатое вещество											
Состав	m , г	ρ , г/см ³	D , см/мкс	$p_{сж}$, Мбар	A , Мбар	B , Мбар	R_1	R_2	ω	E_0 , Мбар	V_0
Октол 75/75	363	1.8	0.848	0.342	7.486	0.1338	4.5	1.199	0.38	0.096	1.0

Примечание. m — масса, ρ — плотность, Y — модуль сдвига, σ — предел текучести, D — скорость детонации, $p_{сж}$ — давление Чепмена — Жуге.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Численное исследование выполнено при помощи кода LS-DYNA3D, который использует метод явных конечных элементов и предназначен для анализа динамических задач, связанных с большими деформациями, ударами с высокой скоростью, баллистическим внедрением, распространением волн и другими аналогичными явлениями. Была сгенерирована трехмерная сетка конечных элементов для лайнера и ВВ. Фактически рассматривалась только одна четверть модели. Были определены две плоскости симметрии и соответствующие граничные условия, для того чтобы упростить анализ и снизить стоимость расчета при моделировании. Все материальные части ускорителя моделировались с использованием восьми узловых твердых элементов. Рассмотрены следующие модели материалов: для лайнера и поддерживающего кольца — тип 10, «Упругопластическая гидродинамика», для ВВ — тип 8, «Горение мощных ВВ». В табл. 1 приведены характеристики материалов, используемых в программе LS-DYNA3D. Применялись также уравнения состояния, пригодные при высоком давлении: для лайнера — тип 4, «Грюнайзен», для ВВ — тип 2, «JWL».

Мы выбрали размеры СФВ-устройства, при которых в расчете получена скорость сформированного элемента около 2500 м/с. Высота головной части заряда 76.3 мм, кривизна нижней поверхности 60.4 мм (рис. 1, б).

Форму верхней поверхности лайнера задавали при двух радиусах кривизны — 43.6 и 71.3 мм, чтобы удовлетворить требованию «складывания крыльев лайнера назад» и получению необходимой массы фрагмента. Толщина лайнера в центре составляла 2.7 мм, на краях — 1.9 мм. На рис. 2 приведены четыре расчетных фазы формирования ядра через 40, 60, 90 и 150 мкс после инициирования. При $t = 60$ мкс формирование фрагмента заканчивалось и его форма стабилизировалась. Скорость ядра приближалась к конечному значению 2488 м/с примерно через 25 мкс после инициирования. Масса ядра была 45.1 г. Результаты расчета показали, что данное устройство удовлетворяет требованиям работы.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Генератор высокоскоростного снаряда изготовлен в соответствии с результатами численного моделирования. Лайнер массой 45 г и диаметром 57.2 мм выполнен из чистого железа. Размер лайнера взят достаточно большим, чтобы не возникало трудностей при определении формы и скорости фрагмента. Размер взрывного устройства в целом был достаточно мал, что приводило к минимальным разрушениям на трассе испытаний. Взрывчатое вещество инициировалось детонатором DP-60 с торца заряда. Высота заряда ВВ 76.3 мм, диаметр 57.2 мм. Полная масса генератора высокоскоростного фрагмента 594 г. На рис. 1, а по-

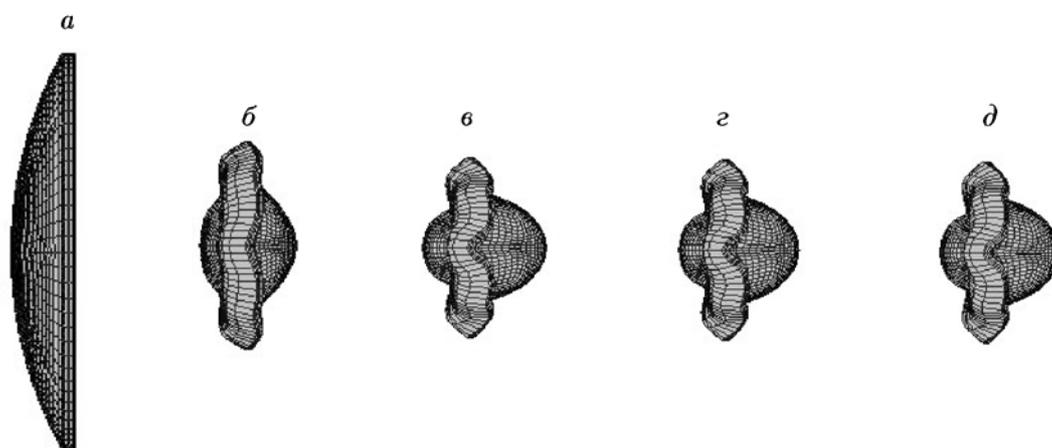


Рис. 2. Процесс формирования ядра:

t , мкс: $a - 0$, $б - 40$, $в - 60$, $г - 90$, $д - 150$

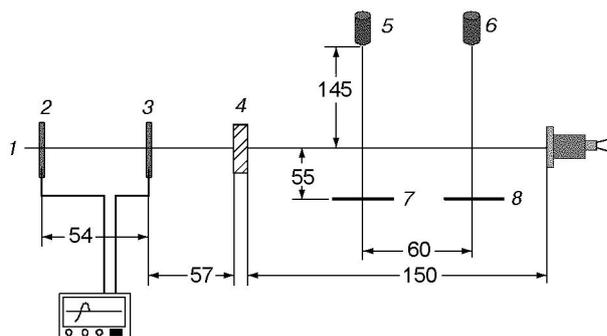


Рис. 3. Схема испытаний генератора высокоскоростного фрагмента:

размеры приведены в сантиметрах; 1 — линия прицеливания, 2 — медный лист № 2, 3 — медный лист № 1, 4 — мишень 50×50 см, 5 — рентгеновская трубка № 2, 6 — рентгеновская трубка № 1, 7 — пленка № 2, 8 — пленка № 1

казан генератор высокоскоростного фрагмента в сборе, который был испытан на трассе, представленной на рис. 3. Для получения изображений фрагмента в полете использовалась двухканальная импульсная рентгеновская установка. Рентгеновские трубки были установлены на расстоянии 145 см от линии прицеливания, плоские пленки размером 43×35 см — на расстоянии 55 см от линии прицеливания. По рентгенограммам определялись профили изображения фрагмента и оценивалась его скорость перед ударом по мишени. Для защиты источников рентгеновского излучения, кассет и других инструментов от разрушения при взрыве мощного ВВ и осколков применялись пластины из

алюминиевого сплава толщиной 10 мм.

Мишенями служили плиты из упрочненного стальными волокнами бетона (SFRC). Поперечные размеры мишеней составляли 50×50 см, толщина варьировалась в диапазоне $4 \div 20$ см. Размеры мишеней были достаточно большими, что облегчало получение достоверных результатов. В структуре мишеней использовалось стальное волокно с концами, загнутыми крючком, с характеристическим отношением 60; волокно занимало 2% объема бетона.

Все снарядоформирующие устройства подрывались на расстоянии 150 см от мишени. Остаточная скорость ядра в каждом опыте измерялась контактным датчиком, состоящим из двух тонких медных листов размером 29.7×21 см, расположенных последовательно на траектории фрагмента за мишенью. Последовательное разрушение листов ядром приводило к изменениям напряжения на выходе специального электрического устройства, которое записывалось осциллографом. По временному интервалу между изменениями напряжения и по расстоянию между листами оценивалась остаточная скорость фрагмента. Стальная пластинка толщиной 1 мм, расположенная перед медными листами, служила покрывающей пластиной, для того чтобы предотвратить разрушение медных листов осколками бетонной плиты, и приводила к некоторому занижению остаточной скорости фрагмента.

Таблица 2

Результаты опытов с генератором высокоскоростного фрагмента

Номер опыта	Полная масса генератора, г	Толщина мишени, см	Время экспозиции, мкс		База измерений скорости, см	Свойства фрагмента, формируемого взрывом		
			трубка № 1	трубка № 2		Средняя скорость, м/с	Объем, см ³	Масса, г
HVPG-1	595	4	151.1	391.1	59.9	2 499	5.58	43.9
HVPG-2	593	10	151.0	391.2	59.2	2 463	5.60	44.1
HVPG-3	592	20	151.1	391.1	59.8	2 494	5.59	43.9
HVPG-4	594	20	151.0	391.1	58.6	2 440	5.55	43.7
Среднее экспериментальное значение						2 474	5.58	43.9
Численный анализ						2 488	5.80	45.1
Различие между экспериментом и расчетом, %						0.57	3.97	2.7

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Было выполнено четыре опыта со взрывным генератором. В табл. 2 приведены номера, параметры и результаты экспериментов. В первом опыте использовалась бетонная плита толщиной 4 см. Фронтальная поверхность мишени вокруг центра была размечена на квадраты. Время экспозиции двух рентгеновских трубок рассчитано с использованием кода LS-DYNA3D и составляло 150 и 390 мкс. Результаты первого опыта HVPG-1 показали, что фрагмент, сформированный взрывом, имеет форму полуэллипсоида с угловыми складками.

Профиль СФВ был оцифрован при помощи сканера, а затем при помощи программы ANSYS была восстановлена объемная форма фрагмента и по ней определены его объем и масса — 5.58 см³ и 43.9 г соответственно. Скорость фрагмента, вычисленная с учетом коэффициента увеличения изображения на пленке, в опыте HVPG-1 составила 2 499 м/с, что близко к расчетному значению 2 488 м/с. Результаты опыта показали, что установка моментов экспозиции для двух рентгенограмм 150 и 390 мкс после детонации дает хорошее изображение снаряда. Эти моменты экспозиции использовались и в последующих опытах. Времена срабатывания контактного датчика составили 954.4 и 1367.2 мкс после детонации, т. е. остаточная скорость фрагмента равна 1 308 м/с. Точно в центре мишени наблюдалось сквозное круглое отверстие диаметром около 12 см (рис. 4, а), что указывает на то, что высокоскоростной фрагмент практически не отклоняется от линии прицеливания.

Опыт HVPG-2 отличался от опыта HVPG-1 тем, что толщина мишени была увеличена до 10 см. Результаты опыта показали, что профиль сформированного фрагмента также близок к полуэллипсоиду. Его объем и масса составляли 5.60 см³ и 44.1 г соответственно, а средняя скорость до мишени 2 463 м/с. После мишени сработал только первый контактный датчик в момент времени 1 869.5 мкс. Мишень в опыте HVPG-2 была пробита насквозь, средний диаметр кратера 31 см был больше (рис. 4, б), чем в первом опыте, т. е. мишенью была поглощена большая часть кинетической энергии фрагмента, и время пробития мишени было больше по сравнению с предыдущим тестом.

В опыте HVPG-3 толщина мишени была увеличена до 20 см. Контуры фрагмента близки к полуэллипсоиду с несколькими «крылышками» и угловыми складками. Его объем и масса составили 5.59 см³ и 43.9 г соответственно, а средняя скорость 2 494 м/с. В этом опыте не наблюдалось активизации датчика остаточной скорости. Возможных причин две. Во-первых, при ударе по более толстой плите из армированного бетона кинетическая энергия остатка фрагмента за мишенью практически равна нулю. Полное поглощение энергии ударника возможно за счет интенсивного движения материала мишени в поперечном направлении. Во-вторых, фрагмент за мишенью может значительно отклоняться от первоначальной траектории и потому не улавливается медными листами контактного датчика. Результаты опыта также показывают, что армирующие сталь-

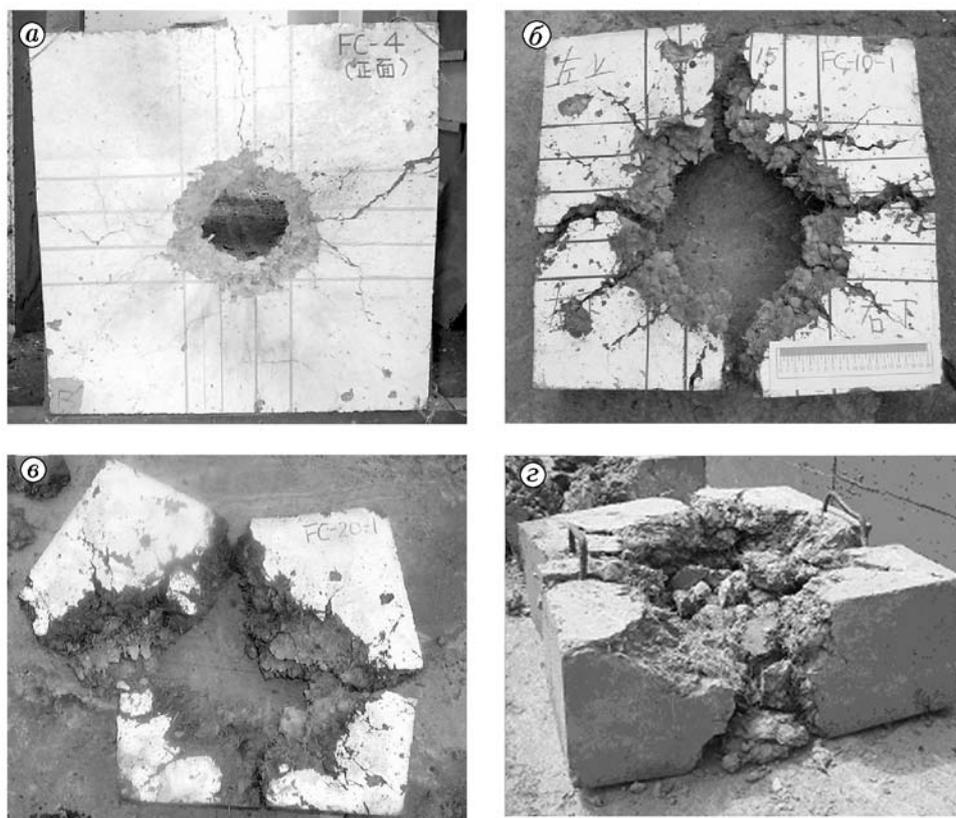


Рис. 4. Вид мишеней в опытах HVPG-1 ÷ HVPG-4

ные волокна локализуют область разрушения за счет снижения хрупкости бетона и увеличения его ударной прочности (сопротивления удару) при внедрении высокоскоростного снаряда (рис. 4, в). Профиль изображения высокоскоростного фрагмента в этом опыте близок к профилю, полученному при численном моделировании и к результатам других опытов (рис. 5).

В опыте HVPG-4 размеры медных листов, элементов датчика остаточной скорости были увеличены с целью проверки предположения, что траектория снаряда за мишенью значительно отклоняется от первоначальной. Толщина мишени оставалась той же, что и в предыдущем опыте, но мишень была заключена в зажимное приспособление из стали для того, чтобы предотвратить движение материала мишени в любом направлении при ударе. Как и в предыдущих опытах, контуры фрагмента близки к полуэллипсоиду с несколькими «хвостиками» и угловыми ребрами. Его объем и масса составили 5.55 см^3 и 43.7 г соответ-

ственно, а средняя скорость 2440 м/с . В этом опыте плита из бетона не была пробита, но разрушилась на несколько кусков радиальными трещинами, наблюдалось также расслоение в направлении по толщине мишени (рис. 4, г). Датчик остаточной скорости не сработал, и покрывающая пластина не была разрушена. Это указывает на то, что плита из армированного бетона в этом опыте смогла сопротивляться удару высокоскоростного снаряда.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основной результат данного исследования — разработка генератора высокоскоростного фрагмента на основе принципов построения кумулятивного заряда. Успешно зарекомендовал себя программный код LS-DYNA3D, использованный для моделирования взрывного формирования высокоскоростного фрагмента. Время экспозиции двух импульсных рентгеновских трубок было правильно предсказано пакетом LS-DYNA3D. Было проведено четы-

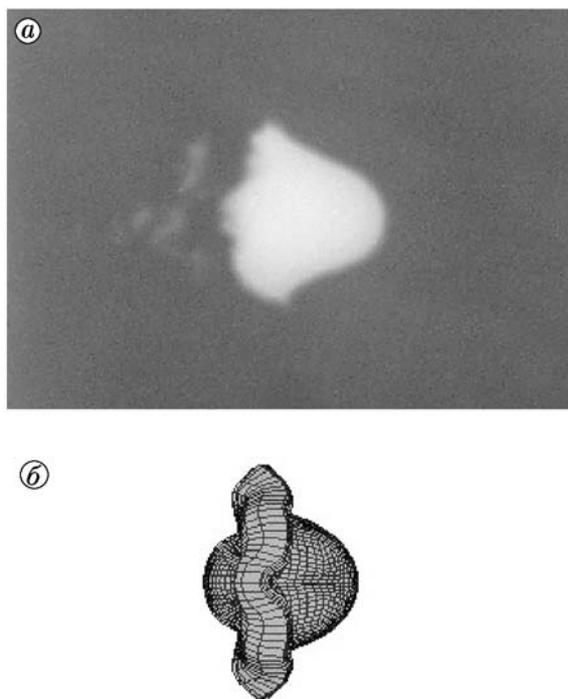


Рис. 5. Профиль сформированного взрывом снаряда в опыте HVPG-4 (а) и результат расчета по коду LS-DYNA3D (б) в момент времени 150 мкс

ре опыта для оценки параметров устройства. Профили сформированных взрывом фрагментов, полученные в опытах, хорошо согласуются с результатами численного анализа. Средняя масса полученных фрагментов примерно 44 г. Их средняя скорость 2474 м/с близка к значению 2488 м/с, предсказанному численным анализом, разница составляет всего 0.57%. Сформированные взрывом фрагменты были хорошо скомпактированы, в полете не вращались, летели точно по линии прицеливания и удовлетворяли всем требованиям, предъявляемым к устройству.

Сравнение результатов четырех экспериментов с результатами численного анализа показывает, что программный код LS-DYNA3D можно с уверенностью использовать для численного моделирования устройств, содержащих мощные ВВ, которые находятся в контакте с металлическими элементами.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Schneider E., Schäfer F.** Hypervelocity impact research-acceleration technology and applications // *Adv. Space Res.* 2001. V. 28. P. 1417–1427.
2. **Wood R. W.** Optical and physical effects of high explosives // *Proc. Roy. Soc. London.* 1936. V. 157A. P. 249–261.
3. **Held M.** Air target warheads // *Intern. Defense Rev.* 1975. V. 5, N 5. P. 123–128.
4. **Pugh E., Eichelberger R., Rostoker N.** Theory of jet formation by charges with lined conical cavities // *J. Appl. Phys.* 1952. V. 23, N 5. P. 532–536.
5. **Harrison J. T.** BASC, an analytical code for calculating shaped charge properties // *Proc. 6th Intern. Symp. on Ballistics, Orlando, FL, 19–27 Oct. 1981.*
6. **Hallquist J. O.** User's Manual for DYNA2D — An Explicit Two-Dimensional Hydrodynamic Finite Element Code with Interactive Rezoning. Lawrence Livermore National Laboratory. 1980. Report UCID-18756.
7. **Hancock S.** PISCES 2DELK User's Manual. Version 4. PISCES International, Holland, 1985.
8. **Cowler M. S., Birnbaum N. K.** AUTODYN — Interactive Non-Linear Dynamic Analysis Software. Oakland, CA: Century Dynamics, Inc., 1997.
9. **MSC-DYTRAN** User's Manual. Version 4.7. MSC Software Corporation, 1999.
10. **Hallquist J. O.** LS-DYNA 3D Keyword User's Manual. Livermore, CA: Livermore Software Technology Corporation, March 2001.
11. **Held M.** Flash X-radiography in ballistics // *Materials Evaluation.* 1985. V. 43. P. 1104–1123.
12. **Held M.** The orthogonal-synchronic-streak-technique as a diagnostic tool, particularly for shaped charge jets // *Propellants, Explosives, Pyrotechnics.* 1986. V. 11. P. 170–175.
13. **Carleone J.** Tactical missile warheads // *Progress in Astronautics and Aeronautics.* 1993. V. 155. P. 367–386.
14. **Walters W. P., Zukas J. A.** Fundamentals of Shaped Charges. 2nd ed. New York: John Wiley and Sons, 1998.

Поступила в редакцию 21/XI 2005 г.