

ФОРМИРОВАНИЕ И ВНЕДРЕНИЕ СТРУИ, ГЕНЕРИРУЕМОЙ ДВУХСЛОЙНЫМ КУМУЛЯТИВНЫМ ЗАРЯДОМ

С. Чжан, Л. Цяо

Факультет машиностроения, Нанкинский университет науки и технологии, Нанкин 210094, Цзянсу, КНР
lynx@mail.njust.edu.cn

Проведен анализ схлопывания лайнера и формирования песта и струи для двухслойного кумулятивного заряда (DLSC). Обсуждаются изменения угла схлопывания, скорости схлопывания лайнера и скорости струи. На основе модели Ли — Тарвера выполнено численное моделирование формирования струи. Для сравнения с обычной кумулятивной струей проведены баллистические опыты с коническим (60°) лайнером из меди диаметром 56 мм. Показано, что угол и скорость схлопывания увеличиваются за счет схождения детонационной волны в заряде DLSC. Скорость струи, кинетическая энергия и баллистическая способность значительно увеличиваются в случае DLSC. Двухслойный кумулятивный заряд является эффективным способом улучшения возможностей кумулятивного заряда.

Ключевые слова: кумулятивный заряд, пересжатая детонация, двухслойный кумулятивный заряд, модель течения, формирование струи, внедрение.

ВВЕДЕНИЕ

Кумулятивный заряд привлекает к себе пристальное внимание в течение последних нескольких десятилетий. Он используется как в военной, так и в гражданской промышленности для различных целей, например, пробивания, глубокого внедрения в материалы, разрезания, профилирования, сварки и пр. Основная цель конструктора кумулятивного заряда состоит в получении максимальной глубины внедрения (или диаметра отверстия) в преграду при минимальном количестве мощного взрывчатого вещества (ВВ). Применение ВВ с более высокой скоростью детонации, оптимизация формы детонационной волны, высокая плотность и пластичность материала лайнера — три основных способа улучшения баллистических возможностей кумулятивного заряда. Среди них наиболее эффективным методом является оптимизация формы детонационной волны. Для этого обычно используют кольцевое (многоточечное) инициирование, формирователь волны и многослойный заряд. Мы будем рассматривать двухслойный кумулятивный заряд (DLSC).

Схема заряда DLSC показана на рис. 1. Взрывная часть состоит из инициатора и

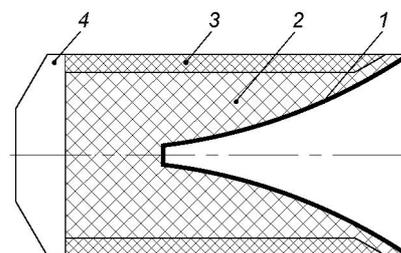


Рис. 1. Схема двухслойного кумулятивного заряда:

1 — лайнер, 2 — внутренний слой ВВ, 3 — внешний слой ВВ, 4 — инициатор (бустер)

основного ВВ. Бустер используется для создания кольцевой начальной детонационной волны. Основной заряд ВВ включал два вида мощных ВВ, соединенных вместе. Внешний слой заряда имеет более высокую скорость детонации и инициируется раньше, чем внутренний слой. Из-за различия в скоростях детонации во внутренней части заряда реализуется пересжатая детонация, которую ведет детонация внешнего слоя. Применение заряда DLSC — эффективный способ улучшения баллистических возможностей кумулятивной струи, при котором нет необходимости в увеличении длины (или диаметра) заряда или выборе нового мощного ВВ.

Эффективность метода является следствием двух различных факторов, наблюдаемых

Zhang Xian-feng, Qiao Liang.

School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, Jiangsu, P. R. China.

при схлопывании лайнера и формировании струи: (а) опережающая детонация внешнего слоя заряда формирует сходящуюся детонационную волну во внутреннем слое, которая, с одной стороны, изменяет угол подхода детонационной волны к лайнеру, а с другой стороны, формирует стационарную полочку Маха, обусловленную нерегулярным отражением вблизи оси; (б) во внутреннем слое заряда достигаются более высокие давления и скорости (пересжатая детонация), что обусловлено сжатием ударной волны, инициируемой внешним слоем заряда.

Ввиду высокой эффективности DLSC и его большого значения в приложениях со сверхвысокими давлениями, исследовательскими группами всего мира выполнено множество работ с этим зарядом. Еще в 1978 г. Мюллер [1] провел опыты по исследованию маховского отражения детонационных волн в двухслойном цилиндрическом заряде (DLC) при помощи импульсной рентгенографии. Во внутреннем слое ВВ наблюдалась мощная детонация за маховским диском. В [2, 3] получены профили детонационной волны для заряда DLC с использованием высокоскоростной стрик-камеры с вращающимся зеркалом. Были исследованы детонационные процессы в зарядах DLC с внутренней частью из тротила, стекла, октогена со связкой 85/15 и ряда других. В [4–7] разработано уравнение состояния продуктов детонации при пересжатой детонации, численно исследована пересжатая детонация при маховском отражении детонационной волны и рассмотрен ряд приложений. В работах [8–10] проведены измерения скорости детонации и давления за пересжатой детонационной волной в двойном цилиндрическом заряде мощного ВВ с использованием манганинового датчика и оптического волокна. Зарегистрированное давление в 4 раза превышало нормальное детонационное давление (Чепмена — Жуге). В [11] выполнены численные и экспериментальные исследования кумулятивной струи, формируемой зарядом с внутренним слоем из высокоплотного состава PBX с вольфрамом. Экспериментально установлено, что начальная скорость струи и скорость ее внедрения в преграду значительно возрастают в случае использования DLSC. В [12, 13] разработана аналитическая модель для предсказания конфигурации детонационной волны в заряде DLC. Согласно результатам численного моделирования форми-

рования струи и процесса внедрения скорость головы струи и ее кинетическая энергия увеличиваются примерно на 20 % при использовании DLSC. Анализ соответствующей литературы показал, что процесс схлопывания лайнера и формирования струи, генерируемой зарядом DLSC, изучен недостаточно.

В настоящей работе представлена аналитическая модель, описывающая схлопывание лайнера и формирование струи и песта для двухслойного кумулятивного заряда. Обсуждаются изменение угла схлопывания, скорость схлопывания лайнера и скорость струи. На основе модели Ли — Тарвера выполнено численное моделирование формирования струи. Проведены соответствующие баллистические опыты с целью сравнения результатов с данными для обычной кумулятивной струи, генерируемой 60-градусным коническим лайнером из металла диаметром 56 мм. Результаты, полученные на основе представленной модели, хорошо согласуются с численными расчетами: угол и скорость схлопывания увеличиваются за счет сжатия детонационной волны и более высокого давления за маховской полочкой в заряде DLSC. Скорость струи, кинетическая энергия и баллистическая способность значительно возрастают в случае DLSC. Двухслойный кумулятивный заряд является эффективным способом повышения возможностей кумулятивного заряда.

1. АНАЛИЗ СХЛОПЫВАНИЯ ЛАЙНЕРА И ФОРМИРОВАНИЯ СТРУИ В ДВУХСЛОЙНОМ КУМУЛЯТИВНОМ ЗАРЯДЕ

Модель распространения детонационной волны в заряде DLC обобщает результаты анализа, выполненного в [13–15], цель которого — включить в рассмотрение регулярное и маховское отражения детонационной волны. Из-за более высокой скорости детонации во внешнем слое детонационная волна во внутреннем заряде задерживается, и с самого начала процесса по внутреннему заряду распространяется коническая детонационная волна. По мере распространения формируется стационарная детонационная волна со стабильной формой фронта. Ввиду различия скоростей детонации двух слоев заряда при распространении детонационной волны в DLC возможны два случая. В первом случае угол падения волны на ось заряда $\psi_i = \arcsin(D_i/D_o)$, где D_o и D_i — скорости детонации внешнего и внутреннего слоев

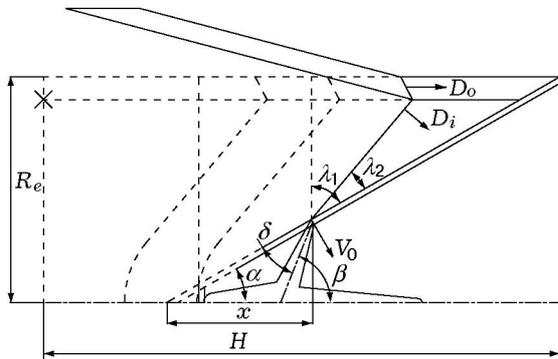


Рис. 2. Схема схлопывания лайнера заряда DLSC

заряда (рис. 2), меньше критического угла $\psi_{i,cr}$ для маховского отражения. Во внутреннем заряде на оси реализуется регулярное отражение детонационной волны с постоянным профилем. Во втором случае $\psi_i > \psi_{i,cr}$ и регулярное отражение невозможно, в этой ситуации следует ожидать маховского отражения.

Из вышесказанного следует, что возможное состояние детонационной волны в DLC определяется параметрами заряда. Скорость детонации большинства мощных ВВ, используемых в военной технике, $6.5 \div 10$ км/с, т. е. отношение скоростей для двухслойного заряда менее 1.5, и угол падения детонационной волны на ось всегда больше 42° . Из результатов [14] следует, что для большинства военных ВВ с показателем политропы продуктов взрыва $\gamma = 2.5 \div 3.3$ критические углы для маховского отражения больше 42° . Таким образом, имеет место случай $\psi_i > \psi_{i,cr}$ и во внутреннем заряде реализуется маховское отражение.

Как уже упоминалось, одной из целей использования заряда DLC было формирование сходящейся детонационной волны и уменьшение угла ее падения на лайнер, что увеличивает скорость элементов схлопывающейся оболочки и скорость формирующейся струи. Для упрощения анализа сделаем следующие предположения:

— стационарное состояние сходящейся детонационной волны во внутреннем слое заряда достигается до коллапса лайнера;

— элементы лайнера ускоряются мгновенно и коллапсируют по прямой;

— эффектами диаметра, кривизны фронта и увеличения скорости детонации в цилиндрическом заряде можно пренебречь;

— толщина внешнего слоя заряда больше критического диаметра детонации;

— в результате кругового инициирования во внешнем слое образуется плоская детонационная волна.

Картина течения в двухслойном заряде и взаимодействие детонационной волны с лайнером показаны на рис. 2. Первая стадия формирования струи — схлопывание лайнера. Из уравнения Тейлора следует соотношение, связывающее угол поворота элемента лайнера δ со скоростью схлопывания V_0 , скоростью детонационной волны D и углом атаки λ (углом подхода детонационной волны к поверхности лайнера):

$$\sin \delta = V_0 \sin \lambda / 2D. \quad (1)$$

Согласно математическому описанию схемы течения угол атаки λ определяется (см. рис. 2) соотношениями:

$$\text{для обычного заряда } \lambda_1 = \pi/2 - \alpha, \quad (2)$$

$$\text{для заряда DLSC } \lambda_2 = \arcsin(D_i/D_o) - \alpha. \quad (3)$$

Скорость схлопывания V_0 рассчитывается по упрощенной формуле Гарни из [16]:

$$V_0 = \sqrt{2E}/[A\{(m/c) + (\beta + 3)/6/(\beta + 1)\}/A + A[n/c + (3\beta + 1)/6(\beta + 1) - 1/3\}]^{1/2}, \quad (4)$$

$$A = [m/c + a(m/c)(\beta - 1) + (\beta + 2)/3(\beta + 1)]/[n/c + (2\beta + 1)/3(\beta + 1)]. \quad (5)$$

Здесь E — энергия Гарни; m , n и c — удельная масса лайнера, оболочки и ВВ соответственно; $\beta = R_o/R_i$, где R_i и R_o — внутренний и внешний радиусы заряда ВВ.

Для расчета угла поворота, скорости течения и масс струи и песта используется PER-теория [17]. В соответствии с предположением Джонса угол схлопывания может быть вычислен из модифицированных уравнений PER-теории [18, 19]:

$$\operatorname{tg} \beta = \operatorname{tg}(\beta^+ + \Delta\beta), \quad (6)$$

$$\operatorname{tg} \Delta\beta = -(x \sin \alpha / \cos(\alpha + \delta) \cos \delta)(V_0'/V_0), \quad (7)$$

$$\beta^+ = 2\delta + \alpha. \quad (8)$$

Здесь x — координата вдоль оси конуса, отсчитываемая от его вершины, штрих означает

дифференцирование по x . После расчета угла β скорость, масса и кинетическая энергия формируемого элемента струи определяются уравнениями:

$$V_j = V_0 \cos(\alpha + \delta - \beta/2) / \sin(\beta/2), \quad (9)$$

$$V_s = V_0 \sin(\alpha + \delta - \beta/2) / \cos(\beta/2);$$

$$\Delta m_j = \Delta m(1 - \cos \beta)/2; \quad (10)$$

$$\Delta E_{kj} = \Delta m_j V_j^2. \quad (11)$$

Для сравнения с имеющимися экспериментальными данными были проведены расчеты для кумулятивного заряда диаметром $56 \div 72$ мм с коническим (60°) лайнером из меди. Взрывчатое вещество — композиция НМХ/РДХ плотностью $\rho_0 = 1.70$ г/см³, широко используемая в кумулятивных снарядах. Скорость детонации ВВ — 8425 м/с, энергия Гарни — $\sqrt{2E} = 3200$ м/с. Наилучшее экспериментальное значение скорости головного элемента струи — 7100 м/с.

В расчетах для двухслойного кумулятивного заряда внутренний слой ВВ считался выполненным из тротила со следующими параметрами Чепмена — Жуге: $\rho_0 = 1.63$ г/см³, $\gamma = 2.856$, $D_{СД} = 6973$ м/с, $\sqrt{2E} = 3000$ м/с. Внешний слой заряда — РВХ-9404, $\rho_0 = 1.84$ г/см³, $D_{СД} = 8800$ м/с. Угол наклона сходящейся детонационной волны $\psi_i = \arcsin(D_i/D_0) = 52.4^\circ$ больше критического угла для маховского отражения $\psi_{i,cr} = 45.5^\circ$, и в заряде DLSC должно реализовываться маховское отражение.

Конечную скорость схлопывания каждого элемента рассчитывали из уравнений (4), (5), а затем из уравнений (1), (6), (9) рассчитывали угол его схлопывания, угол поворота и скорость. Результаты расчета приведены на рис. 3, 4. Из рис. 3 видно, что при уменьшении угла атаки λ угол схлопывания β и угол поворота δ отдельных элементов лайнера уменьшаются в случае DLSC по сравнению с обычным кумулятивным зарядом. При этом скорость струи, формируемая зарядом DLSC, выше, чем у обычного кумулятивного заряда, несмотря на уменьшение скорости схлопывания. Скорость головы струи от DLSC увеличивается на 18 %, а различие скоростей элементов струи от DLSC и обычного кумулятивного зарядов уменьшается при увеличении координаты x от вершины конуса.

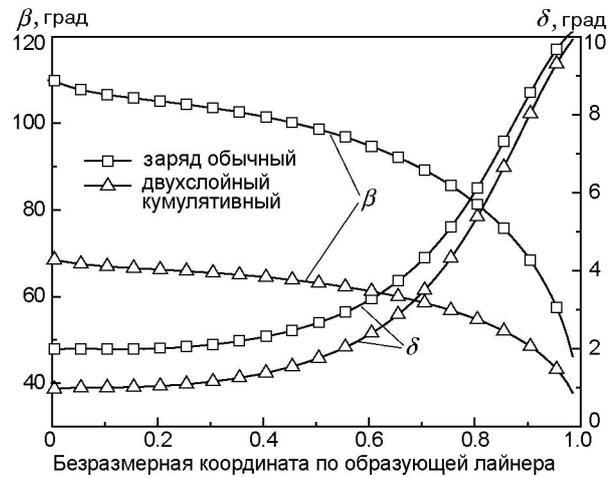


Рис. 3. Угол схлопывания β и угол поворота δ как функции безразмерной координаты по образующей лайнера

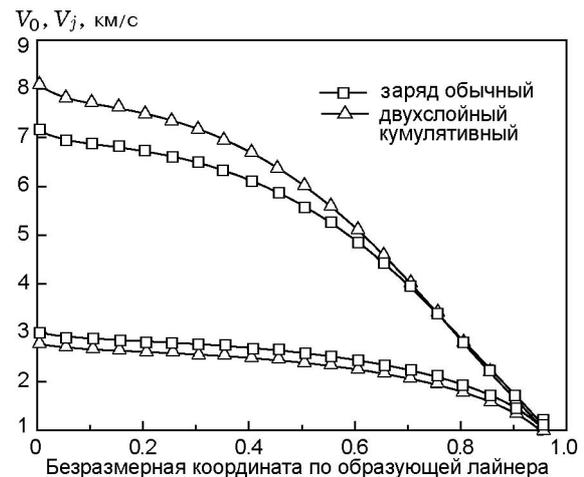


Рис. 4. Рассчитанные скорость схлопывания и скорость струи как функции безразмерной координаты по образующей лайнера:

нижняя пара кривых — скорость песта V_0 , верхняя пара — скорость струи V_j

2. МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ СТРУИ В ЗАРЯДЕ DLSC

Как упоминалось выше, эффективное использование заряда DLSC связано с уменьшением угла подхода детонационной волны к лайнеру и искривленной маховской полочкой с более высоким давлением. В модели, изложенной выше, для заряда DLSC рассмотрено только влияние уменьшения угла атаки, а вклад повышенного давления за маховской полочкой не рассматривался. В действительности схлопы-

вание лайнера за маховой полочкой есть суммарный эффект повышенного детонационного давления и меньшего угла атаки. Для того чтобы лучше понять формирование струи в заряде DLSC, было проведено численное моделирование при помощи AUTODYN®.

В отличие от традиционных мощных ВВ, используемых в кумулятивном заряде, детонация внутреннего слоя заряда DLSC вызывается детонацией его внешнего слоя. Предварительный анализ возможных значений относительного объема и внутренней энергии показал, что модель JWL неприменима для описания ударного инициирования внутреннего слоя DLSC. В настоящем исследовании для этого использовали модель воспламенения и роста, предложенную Ли и Тарвером [20, 21]. В расчетах внешний слой считался выполненным из PBX-9404, внутренний — из литого тротила с более низкой скоростью детонации. В табл. 1 приведены детонационные параметры используемых ВВ (состав В — энергетический материал для обычного кумулятивного заряда).

Для описания детонации и ударного инициирования мощного ВВ, схлопывания лайнера и формирования струи использовались эйлеровы коды. Конечно-элементная аксиально-симметричная модель заряда DLSC показана на рис. 5. Для имитации начальной кольцевой

детонации был использован специальный инициатор.

Внутренний слой заряда был покрыт оболочкой из нейлона для того, чтобы предотвратить прямое возбуждение детонационной волны внутри заряда, и инициировался кольцевой детонационной волной. Внешний слой заряда имел толщину 5 мм, что превышает критический диаметр используемого ВВ. Схлопывание лайнера и образование струи моделировали как для обычного кумулятивного заряда, так и для заряда DLSC. Типичная картина взаимодействия детонационной волны с лайнером показана на рис. 6. Видно, что в обычном заряде детонационная волна, распространяющаяся

Таблица 1

Параметры мощных ВВ,
используемых при моделировании

ВВ	ρ , г/см ³	$D_{СД}$, м/с	$p_{СД}$, ГПа
Состав PBX-9404	1.84	8800	37.0
Литой тротил	1.63	6930	21.0
Состав В	1.70	7840	29.5

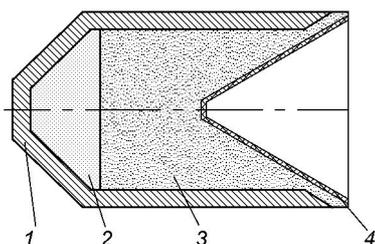
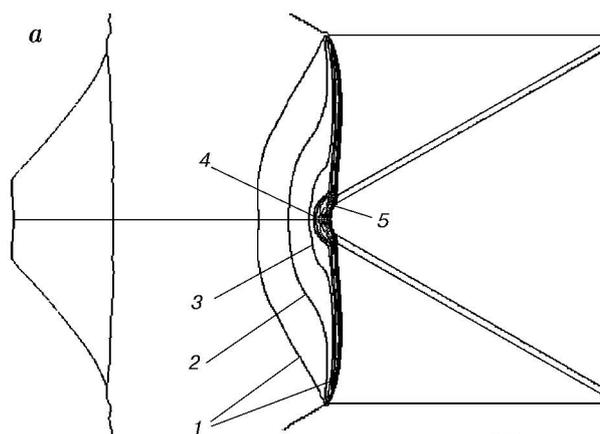


Рис. 5. Численная модель для двухслойного кумулятивного заряда:

1 — внешний слой ВВ, 2 — формирователь плоской волны, 3 — внутренний заряд ВВ, 4 — лайнер



p , Мбар :

1	0.1000 ÷ 0.1571
2	0.1571 ÷ 0.2143
3	0.2143 ÷ 0.2714
4	0.2714 ÷ 0.3857
5	0.3587 ÷ 0.5000

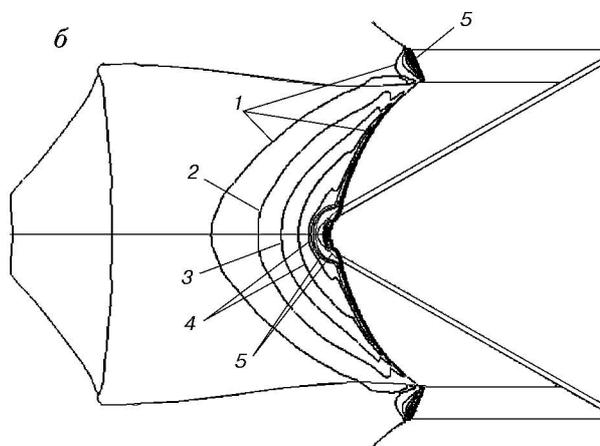


Рис. 6. Взаимодействие детонационной волны с лайнером:

a — обычный заряд, *b* — двухслойный кумулятивный заряд

Таблица 2

Результаты моделирования струи, формируемой зарядом DLSC и обычным кумулятивным зарядом

Тип заряда	Время, мкс	Скорость головы струи, м/с	Скорость песта, м/с	Длина струи, мм	Энергия, 10^5 Дж
Обычный	36	7 160	776	166	1.02
Двухслойный	30.6	9 032	841	168	1.33

с начала инициирования, имеет выпуклую сферическую форму фронта с приблизительно постоянным радиусом кривизны. Фронт детонации во внешнем слое заряда DLSC «ведет» детонацию во внутреннем слое. Для заряда DLSC наблюдается маховская полочка с более высоким давлением за ее фронтом и постоянной скоростью распространения. При коллапсе лайнера угол падения детонационной волны на лайнер значительно уменьшается в случае заряда DLSC, что приводит к увеличению скорости схлопывания лайнера.

В табл. 2 и на рис. 7 приведены ряд характеристик струи и ее скорость в обычном заряде и DLSC соответственно. Скорость головы струи и ее энергия увеличиваются приблизительно на 22 % для DLSC. В этом случае (см. рис. 7) локальная скорость элементов струи возрастает значительно быстрее по длине струи, и это означает, что увеличение энергии струи от двухслойного заряда связано с ее скоростью. Результаты численного моделирования дают большие значения скорости струи и ее энергии для заряда DLSC. Причина — более высокое давление за маховской по-

лочкой, обусловленное нерегулярным отражением сходящейся детонационной волны, что не было включено в аналитическую модель. На одном и том же расстоянии от мишени длины кумулятивных струй, полученные по двум вариантам расчета, слегка отличаются, т. е. при использовании заряда DLSC в боеприпасах необходимо выбирать иное фокусное расстояние.

3. БАЛЛИСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗАРЯДА DLSC

Баллистические эксперименты проводили с кумулятивными зарядами без оболочки калибром 56 мм. Лайнер заряда с углом 60° был выполнен из меди OFHC, толщина стенки 1 мм (рис. 8). В качестве внутреннего слоя заряда использовали три типа мощных ВВ с низкой скоростью детонации (табл. 3): октоген (HMX) с порошком вольфрама (массой 5, 10 и 15 % соответственно); октоген меньшей плотности и заряд из флегматизированного гексогена. Обычный кумулятивный заряд состоял из октогена, скорость детонации 8 425 м/с. Все баллистические опыты были проведены при установке кумулятивного заряда на расстоянии 100 мм от мишени. На рис. 9 показаны отдельные части двухслойного кумулятивного

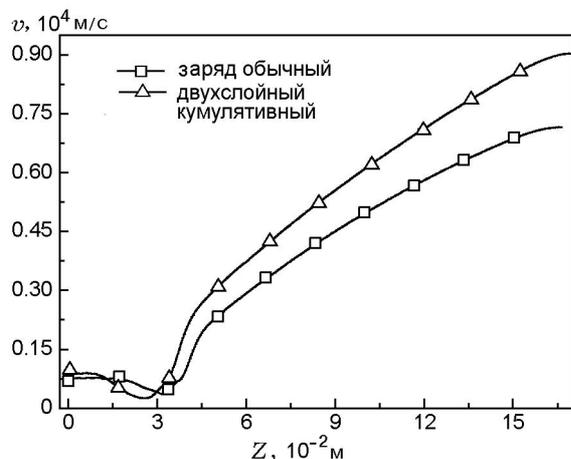


Рис. 7. Распределение скорости по длине струи

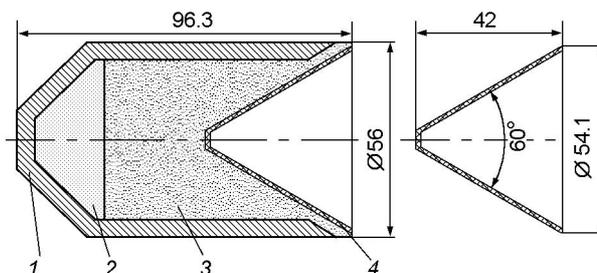


Рис. 8. Поперечное сечение двухслойного кумулятивного заряда и его лайнера:

1 — внешний слой ВВ, 2 — формирователь плоской волны, 3 — внутренний слой ВВ, 4 — лайнер

Таблица 3

Характеристики двухслойного кумулятивного заряда в баллистических экспериментах

Тип ВВ	Внутренний слой		Внешний слой		Полная масса заряда, г
	Плотность, г/см ³	Масса, г	Плотность, г/см ³	Масса, г	
Обычный заряд	1.700	268.8	—	—	321.5
HMX + 5 % W	1.696	194.3	1.693	85.8	332.8
HMX + 10 % W	1.824	206.1	1.700	86.2	345.1
HMX + 15 % W	1.984	220.6	1.699	86.1	359.4
Флегматизированный гексоген	1.646	189.7	1.697	86.0	328.6
Октоген малой плотности	1.590	184.3	1.699	86.1	323.1

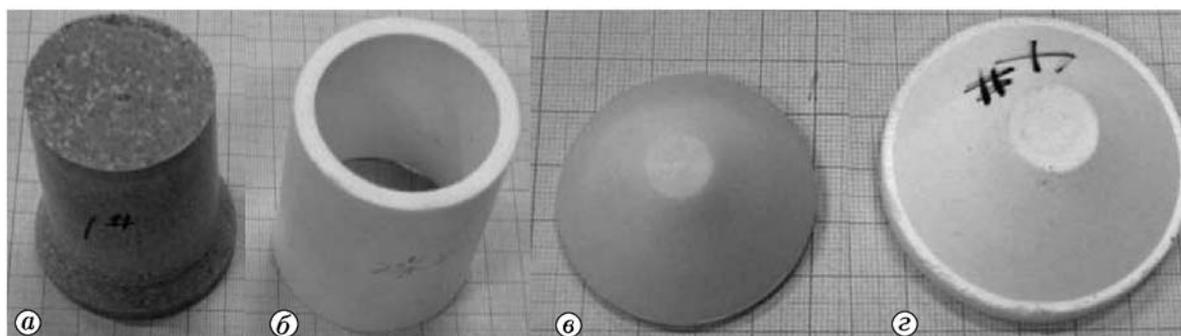


Рис. 9. Фотографии отдельных элементов двухслойного кумулятивного заряда:

a — внутренний заряд ВВ с лайнером, *b* — внешний слой ВВ, *в* — инертная вставка, *г* — инициатор

заряда до его сборки.

В баллистических опытах, схема проведения которых показана на рис. 10, цилиндрическая полубесконечная преграда была выполнена из среднеуглеродистой стали, типичного материала для подобных экспериментов. Для измерения диаметров входного и выходного отверстий в качестве полубесконечной преграды использовали составную мишень. Диаметры ее частей 100 и 60 мм, толщины 220 и 100 мм. В



Рис. 10. Постановка баллистического эксперимента

соответствии с методами оценки баллистической возможности кумулятивных боеприпасов [22] при оценке способности внедрения струи от заряда DLSC учитывался также объем каверны.

Для того чтобы проверить возможности DLSC-струи, были проведены баллистические эксперименты, в которых в качестве внутреннего слоя заряда использовали пять типов ВВ. Результаты по внедрению струи в преграду (среднее двух опытов) представлены в табл. 4. Увеличение примерно на 15 ÷ 20 % способности к внедрению струи от заряда DLSC согласуется с нашими теоретическими предсказаниями. В случае кумулятивного заряда с внутренним слоем из HMX + 10 % W достигается максимальное (33 %) увеличение объема каверны по сравнению с обычным кумулятивным зарядом на основе октогена. Типичный профиль отверстия внедрения струи в мишень из среднеуглеродистой стали приведен на рис. 11. Видно, что в случае заряда DLSC диаметр пробоины

Таблица 4

Результаты баллистических экспериментов с двухслойным и обычным кумулятивным зарядами

Тип ВВ	Мишень 1		Мишень 2		Полная глубина, мм	Объем каверны, см ³
	Входное отверстие, мм	Выходное отверстие, мм	Входное отверстие, мм	Глубина, мм		
Обычный заряд	∅ 18.5	∅ 8.2	—	—	221	24.630
НМХ + 5 % W	∅ 17.0	∅ 6.0	∅ 6.0	25	245	28.739
НМХ + 10 % W	∅ 23.0	∅ 9.0	∅ 9.0	30	250	32.806
НМХ + 15 % W	∅ 22.0	∅ 6.0	∅ 6.0	20	222	26.485
Флегматизированный гексоген	∅ 18.0	∅ 9.0	∅ 9.0	25	245	29.763
Октоген малой плотности	∅ 17.0	∅ 7.0	∅ 7.0	30	250	28.672

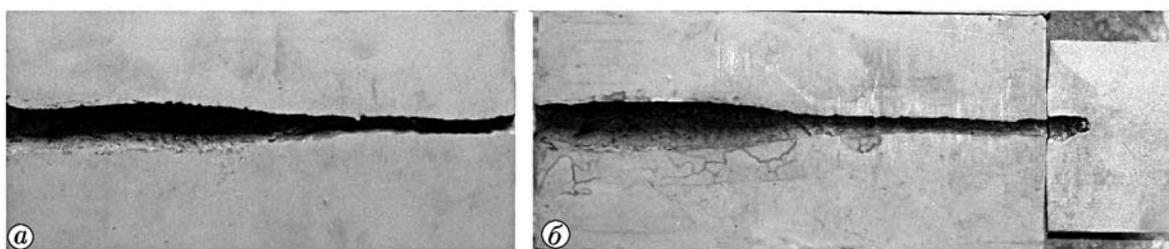


Рис. 11. Профиль пробойны в мишени из среднеуглеродистой стали:

а — обычный кумулятивный заряд, б — двухслойный кумулятивный заряд

больше. Основная причина — более высокая скорость струи от заряда DLSC почти при той же длине, что и в случае обычного кумулятивного заряда, на равном фокусном расстоянии. За счет ограниченного фокусного расстояния в случае заряда DLSC струя внедряется в преграду до того, как она увеличится до максимальной длины, и большая часть ее энергии расходуется на увеличение диаметра пробойны.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе исследовано схлопывание лайнера и формирование струи в двухслойном кумулятивном заряде. Более высокое давление за маховской полочкой и сходящаяся детонационная волна — основные причины улучшения схождения лайнера и формирования струи. Проведен анализ схлопывания лайнера и формирования струи с учетом уменьшения угла подхода детонационной волны к лайнеру. Согласие между аналитической моделью,

экспериментами и численными моделированием вполне удовлетворительное. Модель может быть улучшена, если необходима более высокая точность, путем учета повышенного давления за полочкой Маха. Все результаты показывают, что и скорость схлопывания лайнера, и скорость струи увеличиваются за счет схождения детонационной волны в заряде DLSC.

Исследовательские работы поддержаны Молодежным стипендиальным фондом Нанкинского университета науки и технологии и Китайским национальным фондом естественных наук (NSFC 10902053). Авторы благодарят проф. Х. Чэнь (Xuiwu Chen, NJUST) за поддержку и одобрение и д-ра С.-Н. Чжао (Xiao-Ning Zhao, NJUST) за содействие при моделировании.

ЛИТЕРАТУРА

1. Müller F. Mach-reflection of detonation waves in condensed high explosives // Propellants, Explos., Pyrotechn. — 1978. — V. 3. — P. 115–121.

2. **Held M.** Behavior of dual composition explosive // Proc. Congres Intern. de Pyrotechnie (EUROPYRO). — 1995. — P. 185.
3. **Ададунов Г. А., Дремин А. Н., Канель Г. И.** Параметры маховского отражения в плексигласовых цилиндрах // ПМТФ. — 1969. — № 2. — С. 126–128.
4. **Liu Z., Nagano S., Itoh S.** Overdriven detonation phenomenon in high explosive // Shock Compression of Condensed Matter. — 1999. — P. 227–230. — (AIP Conf. Proc.; V. 505).
5. **Liu Z., Tanaka K., Itoh S.** A method for producing extra-high dynamic pressure due to the efficient use of high explosive // J. Pressure Vessel Technol. — 2004. — V. 126. — P. 264–272.
6. **Liu Z., Kubota S., Itoh S.** Numerical study on hypervelocity acceleration of flyer plates by overdriven detonation of high explosive // Intern. J. Impact Eng. — 2001. — V. 26. — P. 443.
7. **Liu Z.** Overdriven Detonation Phenomenon and its application to ultra-high pressure generation: Doctoral Dissertation. — Kumamoto University, Japan, March 2001.
8. **Otsuka M., Hida E., Morimoto H.** Effective using for overdriven detonation in high explosives // 25th Intern. Congress on High-Speed Photography and Photonics / C. Cavallier, Graham P. Haddleton, M. Hugenschmidt (Eds). — SPIE. — 2003. — V. 4948.
9. **Itoh S.** Visualization of an overdriven detonation phenomenon in a high explosive // J. Flow Visualization and Image Processing. — 1999. — V. 6. — P. 295–304.
10. **Hamada T., Itoh S., Kato H.** An investigation on overdriven detonation phenomenon in concentric double cylindrical high explosive // Mater. Sci. Forum. — 2004. — V. 465–466. — P. 379–385.
11. **Kato H., Murata K., Itoh S., et al.** Application of overdriven detonation in high density explosive to shaped charge // 23rd Intern. Symp. on Ballistics, Tarragona, Spain, 16–20 April 2007. — P. 223–229.
12. **Zhang X.-F., Huang Z.-X., Qiao L.** Detonation wave propagation in double-layer cylindrical high explosive charges // Propellants, Explos., Pyrotechn. — 2010, принята для публикации.
13. **Zhang X.-F., Ding J.-B., Zhao X.-N.** Numerical simulation of double layer shaped charge // Explosion and Shock Waves. — 2009. — V. 30. — P. 63–67.
14. **Dunne B. B.** Mach reflection of detonation waves in condensed high explosive. II // Phys. Fluids. — 1961. — V. 4. — P. 918–924.
15. **Sternberg H. M., Piacesi D.** Interaction of oblique detonation waves with iron // Phys. Fluids. — 1966. — V. 9. — P. 1307.
16. **Hirsch E.** Simplified and extended Gurney formulas for imploding cylinders // Propellants, Explos., Pyrotechn. — 1986. — V. 11. — P. 6–11.
17. **Jones D. A.** A simple model for jet formation in shaped charge // Propellants, Explos., Pyrotechn. — 1992. — V. 17. — P. 43–47.
18. **Liu Gui-Xi.** The simplified model for predicting shaped charge jet parameters // Propellants, Explos., Pyrotechn. — 1995. — V. 20. — P. 279–286.
19. **Pugh E., Eichelberger R., Rostoker N.** Theory of jet formation by charges with lined conical cavities // J. Appl. Phys. — 1952. — V. 23. — P. 532–535.
20. **Oliveira G.** Numerical studies of the behavior of heterogeneous explosives using the ignition and growth model: Doctoral Dissertation. — Rensselaer Polytechnic Institute Troy, New York, 2006.
21. **Lee E. L., Tarver C. M.** Phenomenological model of shock initiation in heterogeneous explosives // Phys. Fluids. — 1980. — V. 2. — P. 2362–2367.
22. **Schwartz W.** Modified SDM model for the calculation of shaped charge hole profiles // Propellants, Explos., Pyrotechn. — 1994. — V. 19. — P. 192–199.

Поступила в редакцию 24/IV 2010 г.