

УДК 532.5; 623.45

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ФОРМИРОВАНИЯ УСТОЙЧИВОГО УДАРНОГО ЯДРА С ЮБКЕЙ

В. Ли, С. Ван, В. Ли, К. Чень

Нанкинский университет науки и технологий, 210094 Нанкин, Китай

E-mails: njstlwb@163.com, 202xm@163.com, lwb2000cn@yahoo.com.cn, 14867442@qq.com

Экспериментально исследовано влияние конструктивных параметров лайнера, состоящего из конуса, сопряженного со сферой, на устойчивость полета формируемых взрывом снарядов. С помощью численного моделирования получены данные о влиянии геометрических параметров кромки лайнера на образование ударного ядра формируемых взрывом снарядов. Показано, что ударное ядро, сформированное лайнером, толщина которого составляет 0,046 калибра заряда, имеет улучшенные полетные характеристики и может пробить плиту из броневой стали толщиной, равной 0,5 калибра заряда, при больших расстояниях от мишени. Также показана возможность создания оптимальной хвостовой юбки формируемых взрывом снарядов, если отношение диаметра лайнера к диаметру заряда равно $0,96 \div 0,98$, толщина кромки лайнера — $0,0020 \div 0,0025$ калибра заряда, угол снятия фаски кромки лайнера — $45 \div 50^\circ$.

Ключевые слова: формируемый взрывом снаряд, устойчивость полета, хвостовая юбка, лайнер, численное моделирование.

DOI: 10.15372/PMTF20160517

Введение. Формируемые взрывом снаряды (ФВС) позволяют создать ударное ядро с улучшенными полетными характеристиками при наличии развитого хвостового оперения, или юбки. Такие ФВС могут поражать мишени на больших расстояниях [1]. Основные способы создания ударных ядер связаны с разработкой оболочки заряда специальной формы, многоточечной инициацией взрывчатого вещества (ВВ), трехмерным формированием лайнера, наличием контроллера формирования взрывных волн, использованием паст ВВ [2–6]. Образование хвостового оперения возможно при определенной форме фронта детонационной волны, что позволяет оптимизировать распределение детонационного давления на формирующий ударное ядро лайнер. Процесс формирования ударного ядра с хвостовым оперением требует высокой точности в синхронизации многоточечной детонации при изготовлении лайнеров. Для получения ударного ядра с юбкой необходимы одноточечная детонация ВВ, соответствующий материал лайнера и соблюдение конструкторских требований [7].

Концепция ФВС с юбкой предложена в 80-х гг. XX в. [1]. В работе [8] экспериментально изучалось влияние технологии обработки лайнера на формирование хвостовой части ударного ядра, определен способ термообработки, при котором исключаются трещины от перетяжек юбки, и получены метаемые элементы с развитыми юбками. В [9] численно и

Работа выполнена при финансовой поддержке Национального фонда естественных наук Китая (грант № 11202103) и в рамках проекта Цин Лань.

© Ли В., Ван С., Ли В., Чень К., 2016

экспериментально исследовался процесс проникания ФВС с юбкой, проведена верификация численных расчетов. Однако работ, посвященных проектированию лайнеров, исследованию методов детонации и взаимосвязи ключевых конструктивных параметров лайнера, обеспечивающих формирование юбки ФВС, недостаточно.

В настоящей работе исследуется кинетическое проникание ударных ядер ФВС при одноточечной инициации и больших расстояниях до мишени. Экспериментально изучается влияние различных конструктивных параметров лайнера, состоящего из конуса, сопряженного со сферой, на устойчивость полета ФВС. Численно исследуется влияние структуры хвостовой части лайнера на формирование ФВС. Предложен способ формирования юбки ударного ядра ФВС при одноточечной детонации.

1. Баллистические испытания ФВС. На основе исследований влияния заряда, имеющего форму усеченного в основании конуса [10], и лайнера, состоящего из конуса, сопряженного со сферой [11], на формирование ФВС рассматривается три типа конструкции заряда. Диаметр заряда равен $D_k = 100$ мм, высота — $H = 0,9D_k$, угол раствора конуса и радиус при вершине (угол скругления) не меняются, толщина лайнера равна $T = 0,042; 0,046; 0,052$ диаметра заряда (образцы А, В, С соответственно). В экспериментах используется взрывчатое вещество марки 8701, оболочка изготовлена из стали марки Ст. 45. Детонация инициировалась в центре основания заряда (рис. 1). Для регистрации формы ударного ядра и траектории полета с помощью высокоскоростного фоторегистратора фиксировался процесс полета и рассчитывалась скорость формирования ФВС. В конце баллистической трассы размещалась плита из броневого стали. Это позволило определить влияние конструктивных параметров лайнера на устойчивость полета ударного ядра.

Каждый вариант конструкции заряда испытывался два раза. После проведения испытаний определялся диаметр отверстия d каждой промежуточной мишени, представляющей собой проволочную сетку. В таблице для каждого варианта заряда приведены средние значения диаметров отверстий сеток-мишеней. Для идентичных образцов диаметры отверстий различаются незначительно. Как следует из таблицы, при увеличении толщины лайнера диаметр отверстий увеличивается, что свидетельствует об увеличении диаметра ударного ядра.

По данным фоторегистрации, скорости образцов А, В, С составили 2370, 2230, 2060 м/с соответственно. При толщине лайнера $0,042D_k$ (вариант А) ударное ядро испытывало вращение во время полета. В варианте В вращение не было зафиксировано. При толщине

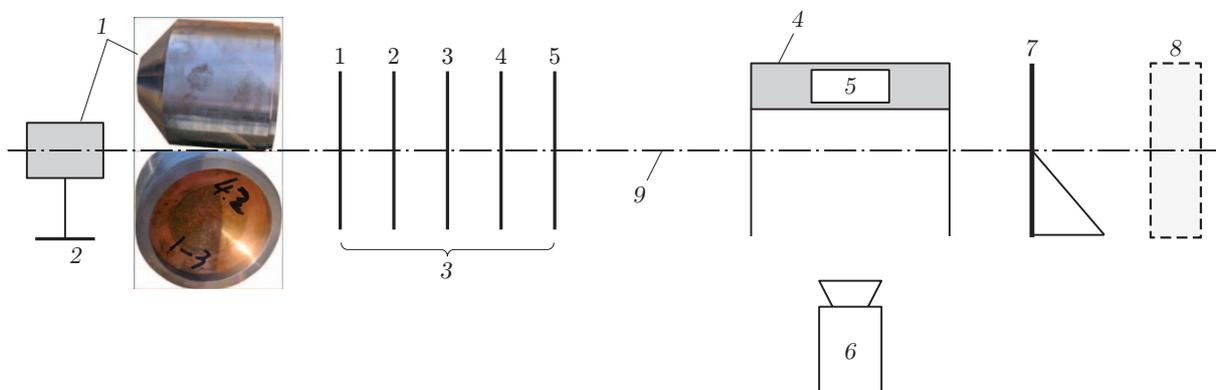


Рис. 1. Схема экспериментального стенда для исследования ФВС:

1 — боеголовка ФВС, 2 — заземление, 3 — сетка-мишень, 4 — картограф, 5 — фоновый экран, 6 — высокоскоростной фоторегистратор, 7 — мишень, 8 — мешок с песком, 9 — траектория полета ФВС

Средние значения диаметров отверстий проволочных сеток после пролета ФВС

Образец	T , мм	d , мм				
		Сетка 1	Сетка 2	Сетка 3	Сетка 4	Сетка 5
A	4,2	44,93	44,88	44,54	44,54	44,55
B	4,6	45,41	45,59	45,72	45,61	45,48
C	5,2	48,94	50,47	50,58	47,75	48,63

лайнера $0,052D_k$ (вариант С) полет был устойчивым, диаметр ударного ядра значительно увеличивался, скорость существенно уменьшалась, что препятствовало глубокому прониканию в мишень.

2. Численное моделирование формирования юбки ФВС. Результаты экспериментальных исследований для заданного калибра формирующего заряда показывают, что ударное ядро вращается во время полета, также отмечена неустойчивость полета. С помощью расчетов проведена дальнейшая оптимизация юбки хвостового оперения ударного ядра. При штамповании взрывом подкалиберный лайнер испытывает значительные радиальные нагрузки, что оказывает положительное влияние на формирование юбки. Скорость формирования ударного ядра и его юбки существенно зависит от толщины кромки лайнера, поэтому рассматриваемые конструктивные варианты заряда имеют дополнительную выемку в виде фаски на границах подкалиберного лайнера.

2.1. Расчетные конфигурации. После предварительных испытаний был выбран заряд с конической тыльной частью и толщиной лайнера $0,046D_k$, форма которого позволяет исследовать влияние конструктивных параметров подкалиберного лайнера на формирование ударного ядра (рис. 2). В качестве таких параметров выбирались отношение диаметра лайнера к диаметру заряда D/D_k , толщина кромки лайнера t , угол снятия фаски β . Шаг изменения соотношения D/D_k составил 0,02 в диапазоне $0,90 \div 1,00$. Учитывалось, что уменьшение диаметра лайнера приводит к уменьшению кинетической энергии ФВС и глубины проникания в преграду. Значение толщины кромки лайнера изменялось с шагом

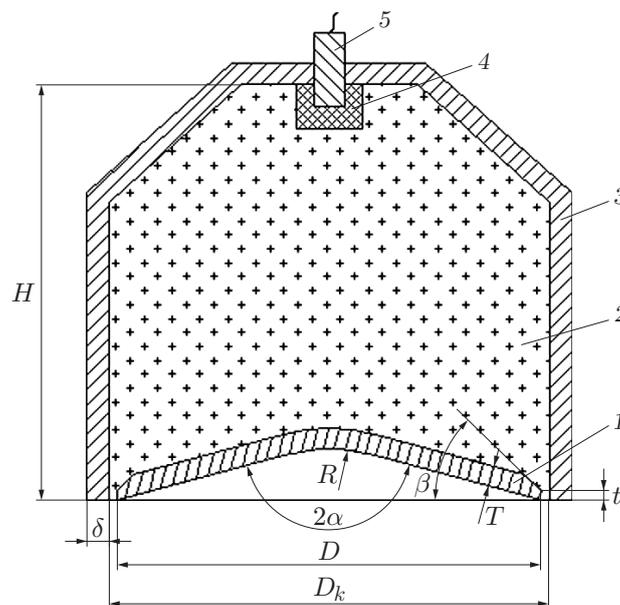


Рис. 2. Схема подкалиберного ФВС усеченной формы и лайнера с фаской: 1 — лайнер, 2 — ВВ, 3 — оболочка, 4 — ударник, 5 — детонатор

0,5 мм в диапазоне $t = 1,0 \div 4,0$ мм, угол снятия фаски изменялся с шагом 5° в диапазоне $\beta = 30 \div 60^\circ$.

Вычисления проводились с использованием программного комплекса LS-DYNA. Для расчета характеристик ВВ, лайнера и воздушной среды применялся алгоритм Лагранжа — Эйлера, характеристики оболочки рассчитывались с использованием алгоритма Лагранжа. Лайнер изготовлен из меди с плотностью 8969 кг/м^3 , оболочка — из стали марки Ст. 45 с плотностью 7830 кг/м^3 . Для описания поведения меди и стали использовались модель Джонсона — Кука и уравнение состояния Грюнайзена. Для описания поведения ВВ с плотностью 1695 кг/м^3 применялись модель высоко взрывного горения и уравнение состояния Джонса — Уилкинса — Ли. Для воздуха с плотностью $2,93 \text{ кг/м}^3$ использовалось уравнение состояния Грюнайзена [12].

2.2. Влияние отношения диаметров лайнера и заряда на формирование ударного ядра. На первом этапе моделировалось влияние отношения D/D_k на формирование ударного ядра (рис. 3,а). При увеличении D/D_k отношение длины к диаметру ФВС сначала увеличивается, а затем уменьшается, скорость ударного ядра изменяется незначительно. Ударное ядро удлиняется, объем внутренней полости увеличивается, вследствие чего центр тяжести смещается вперед и обеспечивает лучшую устойчивость полета. В то же время юбка становится менее выраженной, что оказывает влияние на полетные характеристики. При $D/D_k = 0,98$ длина ФВС достигает максимума, при этом хвостовая часть разрушается, и получить юбку с улучшенными характеристиками не представляется возможным, что ограничивает применение данной конфигурации лайнера. Из анализа формы ударного ядра и параметров, при которых оно формируется, следует, что получить оптимальную форму ударного ядра можно при $D/D_k = 0,96 \div 0,98$.

2.3. Влияние толщины кромки лайнера на формирование ударного ядра. Для исследования влияния толщины кромки лайнера t на формирование ударного ядра диаметр основания подкалиберного конуса выбирался равным 96 мм, угол $\beta = 45^\circ$, остальные параметры были постоянными (рис. 3,б).

С увеличением толщины кромки лайнера t форма головной части ударного ядра не меняется, однако изгиб в направлении полета хвостовой части становится менее выраженным. При $t = 2,5$ мм происходит отрыв части хвоста ударного ядра, что приводит к уменьшению массы ФВС, а следовательно, и глубины проникания. Разрушение хвостовой части в основном обусловлено тем, что при $t \geq 2,5$ мм с фаской снимается меньше материала. Поскольку толщина лайнера в области снятия фаски становится значительной, при взрывном формировании ударного ядра скорость хвостовой части относительно мала, вследствие чего увеличивается разность скоростей носовой и хвостовой частей ФВС. Концентрация напряжений наиболее вероятна на острых кромках, поэтому хвостовая часть наиболее подвержена разрушению. Тем не менее при $t < 2,5$ мм лайнер с фаской получает достаточное количество энергии заряда, при этом толщина лайнера небольшая. Скорость хвостовой части может достичь скорости носовой части при формировании ударного ядра в течение малого промежутка времени. Поэтому отношение длины к диаметру ФВС сначала линейно увеличивается, при $t = 2,5$ мм достигает максимума, а затем уменьшается до некоторого значения. Скорость ударного ядра изменяется незначительно. Фактически толщина кромки лайнера t не оказывает существенного влияния на формирование ФВС, в основном она влияет на структуру хвостовой части. Из рис. 3,б следует, что для получения ФВС с улучшенными характеристиками формы ядра и обеспечения устойчивости полета толщина кромки лайнера должна меняться в диапазоне $t = 2,0 \div 2,5$ мм.

2.4. Влияние величины угла снятия фаски лайнера на формирование ударного ядра. Для анализа влияния величины угла снятия фаски β кромки лайнера на формирование ударного ядра толщина кромки лайнера выбиралась равной $t = 2$ мм. Как следует из

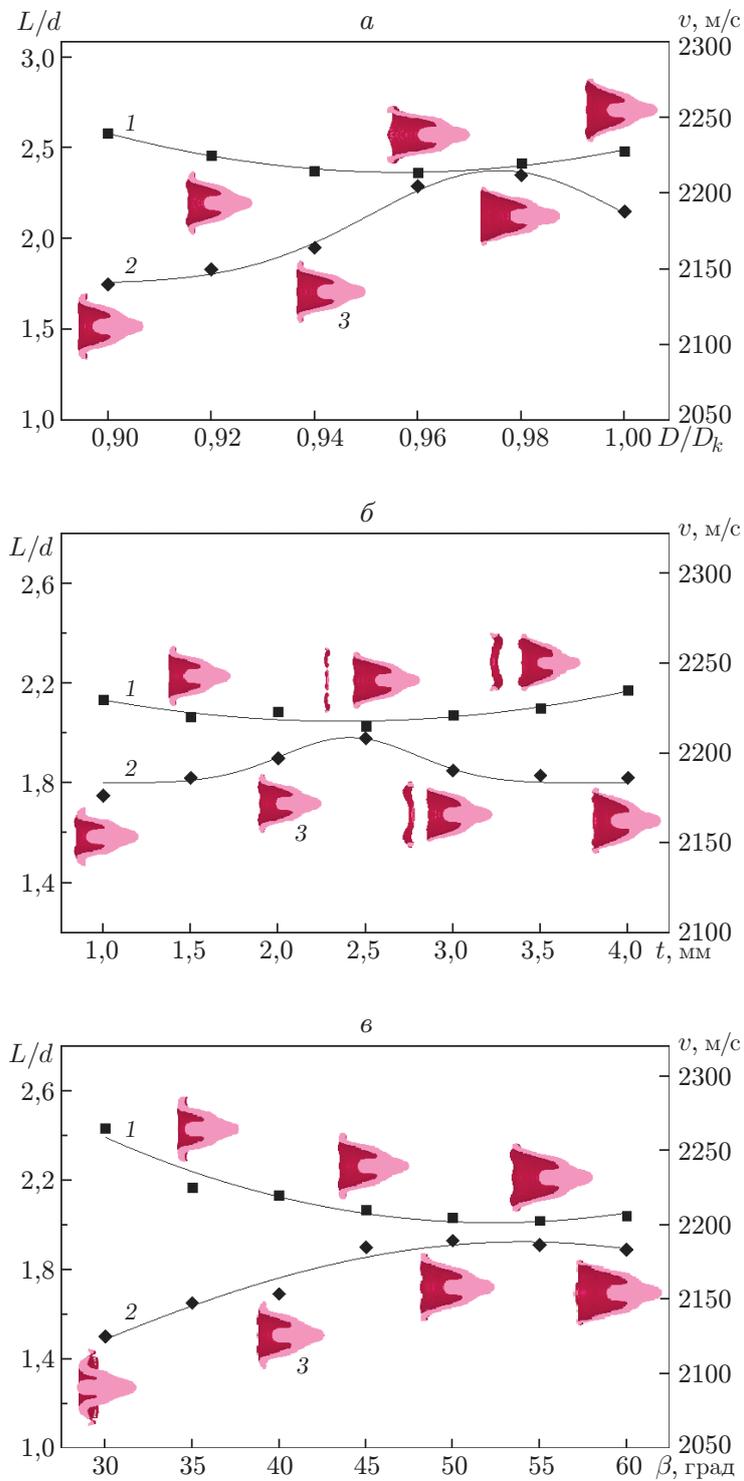


Рис. 3. Зависимости скорости (1) и отношения длины ударного ядра к его диаметру (2) от величины D/D_k (*a*), толщины кромки лайнера t (*б*) и угла β (*в*), а также формы ударного ядра (3)

рис. 3, в, с увеличением угла β форма головной части ФВС не меняется, однако при больших значениях угла снятия фаски изгиб юбки в направлении полета уменьшается. При $\beta = 55^\circ$ юбка разрушается, поэтому использование такого ФВС малоэффективно. Поскольку в ударном ядре содержится меньше материала, проникающая способность ФВС уменьшается. Разрушение хвостовой части при $\beta \geq 55^\circ$ происходит прежде всего потому, что объем снимаемого с фаской материала мал, при этом с увеличением β толщина кромки лайнера увеличивается. В результате скорость хвостовой части в процессе взрывного штампования лайнера относительно мала, а разность скоростей хвостовой и носовой частей увеличивается. Концентрация напряжений наиболее высока на заостренных кромках, в результате чего материал подвергается разрушению. При $30^\circ < \beta < 55^\circ$ с фаской снимается больше материала и толщина кромки лайнера уменьшается. Разрушения не происходит, поскольку в процессе формирования скорость хвостовой части может достигнуть значения, равного скорости головной части, в течение малого промежутка времени. При $\beta \leq 30^\circ$ тонкая область со снятым с фаской материалом удлиняется, поэтому при формировании ударного ядра взрывом происходит ее фрагментирование. Это также приводит к увеличению скорости хвостовой части, которая может превысить скорость носовой части ударного ядра. В результате ФВС приобретает W-образную продолговатую форму с малым отношением длины к диаметру, хвостовая часть разрушается.

С увеличением β ударное ядро постепенно удлиняется, достигая максимальной длины при $\beta = 50^\circ$. При $\beta > 50^\circ$ относительная длина L/d постепенно уменьшается. Поскольку при увеличении β толщина хвостовой части увеличивается, скорость ФВС постепенно уменьшается, в целом она изменяется незначительно. Из рис. 3, в следует, что для формирования ударного ядра с оптимальными характеристиками величина угла должна быть равна $\beta = 45 \div 50^\circ$.

Заключение. В работе исследованы стадии полета и проникания ударного ядра ФВС с калибром заряда $D_k = 100$ мм и толщиной лайнера $0,042D_k$, $0,046D_k$, $0,052D_k$. Экспериментально показано, что ударное ядро, формируемое лайнером толщиной $0,046D_k$, имеет лучшие характеристики устойчивости полета и может пробивать плиту из броневой стали толщиной $0,5D_k$ на больших расстояниях.

Проведено численное моделирование, позволившее определить влияние отношения диаметра лайнера к диаметру заряда D/D_k , толщины кромки лайнера t , угла снятия фаски кромки лайнера β на формирование ударного ядра. Установлено, что оптимальная форма юбки ФВС образуется в диапазоне параметров $D/D_k = 0,96 \div 0,98$, $t = 0,0020 \div 0,0025D_k$, $\beta = 45 \div 50^\circ$.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Ren Huiqi, Yang Renhua, Wu Xiangyun.** Research on the engineering destroying effect of high-effect damage ammunition. Luoyang: Three res. department of engng Corps, 2005.
2. **Bender D., Chhouk B., Fong R.** Explosively formed penetrators (EFP) with canted fins // Proc. of the 19th Intern. symp. on ballistics, Interlaken (Switzerland), 7–11 May 2001. Thun: IBS2001 Symp. Office, 2001. V. 5. P. 7–11.
3. **Carleone J., Bender D. E., Fong R.** A unique method of providing an explosively formed penetrator with fins // Proc. of the 17th Intern. symp. on ballistics, Midrand (South Africa), 23–27 Mar. 1998. Molereta Park: South African Ballistics Organization, 1998. P. 55–62.
4. **Bouet T. H., Tarayre P., Guillon J. P.** Study of a multi-point ignition EFP // Proc. of the 15th Intern. symp. on ballistics, Jerusalem (Israel), 21–24 May 1995. Tel Aviv: Supplier, 1995. P. 159–166.

5. **Weimann K.** Flight stability of EFP with star shaped tail // Proc. of the 14th Intern. symp. on ballistics, Quebec (Canada), 26–29 Sept. 1993. Quebec: Nat. Defence Res. Establishment, 1993. P. 755–763.
6. **Li Chengbing, Shen Zhaowu, Zhao Huiying, Pei Mingjing.** Investigation of forming mechanism of explosively formed projectiles with tails // J. Univ. Sci. Technol. China. 2006. V. 36, N 4. P. 383–397.
7. **Fomin V. M.** High-velocity interaction of bodies / V. M. Fomin, A. I. Gulidov, G. A. Sapozhnikov, et al. Novosibirsk: Izd. Sib. Otd. Ross. Akad. Nauk, 1999. (In Russian.)
8. **Faccini E. C., Woodbury H.** Empirical determination of the manufacturing process which affect EFP liner performance // J. Testing Evaluat. 1996. V. 24, N 2. P. 123–130.
9. **Rondot F.** A predictive numerical tool to determine the limit of perforation of EFPs // J. Physique. 2000. V. 10, N PR9. P. 629–634. DOI: <http://dx.doi.org/10.1051/jp4:20009105>.
10. **Li W., Wang X., Li W., Zheng Yu.** Research on the optimum length-diameter ratio of the charge of a multimode warhead // Shock Waves. 2012. V. 22, N 3. P. 265–274.
11. **Li W., Wang X., Li W., Zheng Yu.** Design optimization of the configuration parameters of multimode warhead // Proc. of the 25th Intern. symp. on ballistics, Beijing (China), 12–21 May 2010. Beijing: S. n., 2010. P. 629–637.
12. **Li W., Wang X., Li W.** The effect of annular multi-point initiation on the formation and penetration of an explosively formed penetrator // Intern. J. Impact Engng. 2010. V. 37, N 4. P. 414–424.

*Поступила в редакцию 6/VII 2014 г.,
в окончательном варианте — 30/IX 2015 г.*
