

УДК 662.2

ЗАМКНУТАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ АНАЛИЗА КУМУЛЯТИВНОГО ЗАРЯДА W-ОБРАЗНОЙ ФОРМЫ

А. Махдиан, М. Гайур, Дж. Х. Лиахат*

Исфаханский технологический университет, 84156–83111 Исфахан, Иран

* Тарбиат модаррес университет, Тегеран, Иран

E-mails: a.mahdian@me.iut.ac.ir, ghayour@cc.iut.ac.ir, ghlia530@modares.ac.ir

Представлена замкнутая модель плоского симметричного кумулятивного заряда (КЗ) W-образной формы, состоящего из двух V-образных секций, в которых создаются два первичных ядра и две первичные струи. Если V-образные секции асимметричны, то первичные ядра вбрасывают первичные струи во вторичное ядро, формирующееся на оси симметрии плоского симметричного КЗ W-образной формы. Для анализа плоского симметричного КЗ W-образной формы предложена обобщенная модель асимметричного плоского КЗ V-образной формы с произвольной асимметрией. С использованием этой модели описан процесс формирования вторичной струи в симметричном КЗ W-образной формы. С помощью замкнутой модели КЗ W-образной формы определены характеристики вторичной струи, проведено их сравнение с характеристиками струи симметричного или асимметричного КЗ V-образной формы. Для первичной и вторичной струй исследованы условия их когерентности и определены критические значения параметров, обеспечивающие когерентность.

Ключевые слова: теория формирования вторичной струи, кумулятивный заряд W-образной формы.

Введение. Плоский или осесимметричный кумулятивный заряд (КЗ) W-образной формы изготавливается из четырех пластин, соединение которых образует букву W. На внешней поверхности W-образной облицовки размещается взрывчатое вещество, при детонации которого возникает детонационная волна, действующая на каждую пластину, в результате чего элементы облицовки получают ускорение. Элементы двух пластин каждой из V-образных секций соударяются в некоторой движущейся точке (ядре), которая может находиться на номинальной оси симметрии этих секций. В данной точке образуются высокоскоростная струя и низкоскоростной пест.

При наличии асимметрии первичные струи каждой из V-образных секций движутся в направлении оси симметрии W-образного КЗ и затем соударяются. Таким образом, прежде чем изучать КЗ W-образной формы, необходимо рассмотреть асимметричный КЗ V-образной формы с соответствующей степенью асимметрии.

В работах [1, 2] представлены модели, описывающие симметричные облицовки. В [3, 4] приведено достаточно полное описание процесса формирования струи, песта и точки стагнации.

Вследствие наличия асимметрии облицовки или заряда, а также других дефектов ядро может располагаться не на оси симметрии, при этом его скорость также может быть направлена не по оси симметрии, что приводит к уменьшению глубины проникания струи.

Начиная с 80-х гг. XX в. большое внимание уделяется изучению процесса формирования асимметричных струи и песта. Экспериментальные методы широко используются при проектировании КЗ, но они должны быть дополнены соответствующими теориями. В [5] представлены результаты исследования влияния асимметрии на глубину проникания струи КЗ, изучено влияние направления скорости ядра, не совпадающего с направлением оси симметрии, а также влияние струй, исходящих из ядра, на характеристики струи. В [6] представлены результаты исследования влияния асимметрии облицовки на положение инициирующего заряда.

В [7] предложена простая замкнутая модель, являющаяся обобщением модели Биркгофа при определенных условиях. Например, в этой модели предполагается, что скорости элементов облицовки постоянны по ее длине, а скорости элементов, принадлежащих каждой из ее поверхностей, различаются незначительно.

В [8] проведен численный и экспериментальный анализ осесимметричного КЗ W-образной формы и исследовано влияние способа инициирования заряда на формирование кольцевой струи.

В данной работе предложено обобщение классической теории формирования струи в плоском КЗ, которое позволяет описать схлопывание облицовки (коллапс) при наличии асимметрии в КЗ W- и V-образной формы [9, 10].

Разрушение асимметричной облицовки V-образной формы. Пусть ось x направлена по номинальной оси симметрии, ось y — перпендикулярно ей, начало координат расположено в вершине клина (рис. 1). Фронт клиновидной волны моделируется двумя плоскими волнами, движущимися с постоянной скоростью U и образующими постоянные углы ψ_1, ψ_2 с осью y .

Предполагается, что элементы, расположенные в точках P_1 и P_2 , мгновенно ускоряются, движутся со скоростями V_{01} и V_{02} в направлениях P_1C и P_2C и встречаются в точке C . Считается, что на разрушение элементов, принадлежащих каждой из поверхностей облицовки, соседние элементы не влияют. В течение промежутка времени, за который элементы, расположенные в точках P_1, P_2 , достигают точки C , элементы, находящиеся на линиях P_1Q_1, P_2Q_2 соответственно, достигают линий CQ_1, CQ_2 , параллельных линиям AP_1, AP_2 и $|CQ_1| = |P_1Q_1|, |CQ_2| = |P_2Q_2|$ соответственно. Кроме того, в течение того же промежутка времени точка A достигает точки C со скоростью V_C , а детонационная волна, скользя по пластинам 1, 2 облицовки, перемещается из точек P_1, P_2 в точки Q_1, Q_2 соответственно. Описание формирования струи асимметричным КЗ V-образной формы приведено в [10].

Элементы, принадлежащие поверхностям 1 и 2 облицовки, имеют различные, но постоянные скорости V_{01} и V_{02} . Скорость фронта волны в направлениях ψ_1 и ψ_2 равна U . Таким образом, необходимо определить шесть величин $\beta_1, \beta_2, \theta_1, \theta_2, \xi, V_C$ (см. рис. 1), для которых имеют место соотношения

$$\begin{aligned} \cos \theta_1 &= \frac{V_{01}}{2U} \cos(\alpha + \psi_1), & \beta_1 &= 180 - 2\theta_1 + \alpha, \\ \cos \theta_2 &= \frac{V_{02}}{2U} \cos(\alpha + \psi_2), & \beta_2 &= 180 - 2\theta_2 + \alpha, \\ \operatorname{tg} \xi &= \frac{A \sin \beta_1 - \sin \beta_2}{A \cos \beta_1 + \cos \beta_2} & \left(A &= \frac{\sin(\beta_2 + \xi)}{\sin(\beta_1 - \xi)} = \frac{V_{02} \sin \theta_2}{V_{01} \sin \theta_1} \right), \\ V_C &= V_{02} \frac{\sin \theta_2}{\sin(\beta_2 + \xi)} = V_{01} \frac{\sin \theta_1}{\sin(\beta_1 - \xi)}. \end{aligned}$$

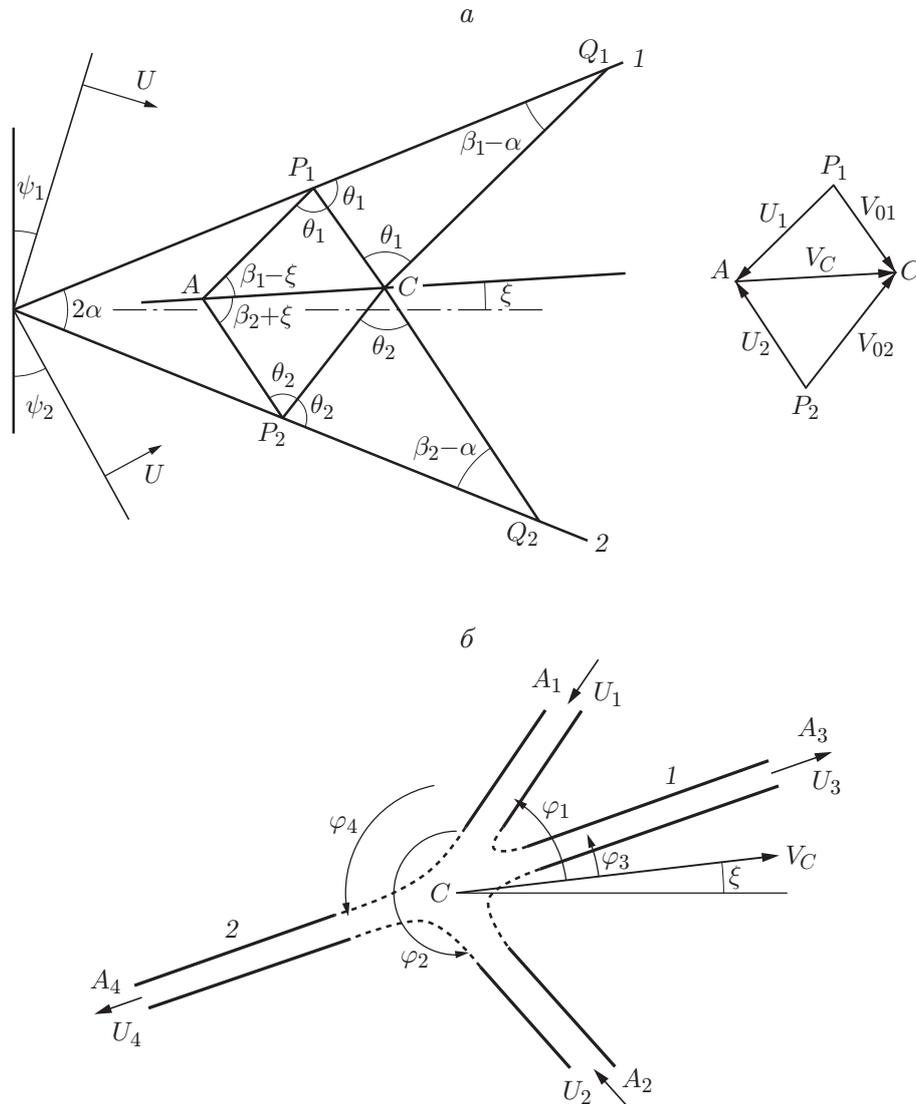


Рис. 1. Схема формирования струи в поперечном сечении асимметричногокумулятивного заряда:

a — геометрия облицовки (1, 2 — поверхности облицовки); *б* — схема течения струи (1 — струя, 2 — пест)

Скорости входящих в ядро потоков U_1 и U_2 , необходимые для вычисления скоростей потоков, выходящих из ядра, в системе координат, движущейся вместе с ядром, определяются следующими соотношениями:

$$U_1 = \frac{V_{01}}{\sin(\beta_1 - \xi)} \sin(180 - \theta_1 - \beta_1 + \xi),$$

$$U_2 = \frac{V_{02}}{\sin(\beta_2 + \xi)} \sin(180 - \theta_2 - \beta_2 - \xi).$$

С использованием ряда уравнений, описывающих взаимодействие двух потоков, можно определить характеристики потоков, исходящих из ядра, а следовательно, характеристики струи и песта.

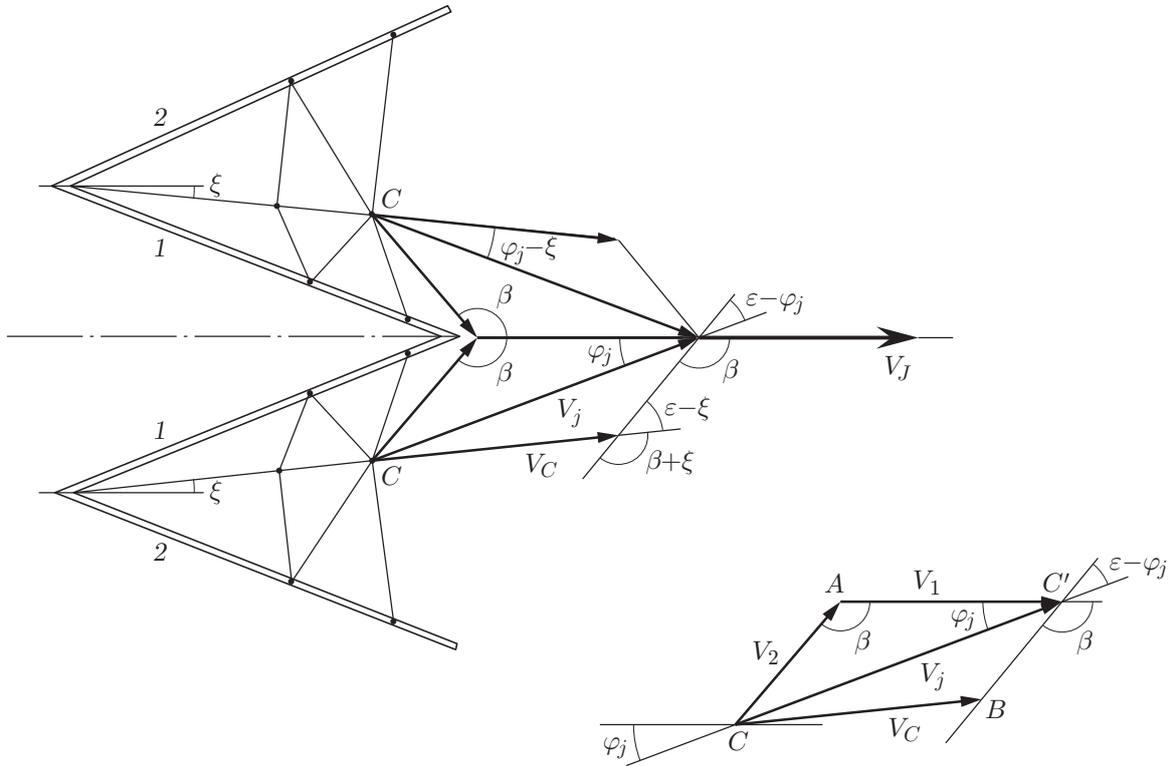


Рис. 2. Схема формирования струи вкумулятивном заряде W-образной формы с асимметричными V-образными секциями:
1, 2 — пластины

Анализ симметричного КЗ W-образной формы с асимметричными секциями V-образной формы. В данном пункте изучается поведение симметричного КЗ W-образной формы с асимметричными V-образными секциями. Проекции скоростей V_{01} , V_{02} не равны, но постоянны для каждой из пластин 1 и 2 (рис. 2). В силу асимметричного расположения пластин 1 и 2 в каждой V-образной секции первичное ядро C будет двигаться со скоростью V_C в направлении оси симметрии КЗ W-образной формы под углом ξ к номинальной оси симметрии каждой из V-образных секций. Из этого первичного ядра выбрасывается первичная струя с абсолютной скоростью V_j , которая образует угол φ_j с номинальной осью симметрии. Таким образом, в соответствии со сказанным выше можно записать следующие соотношения:

$$\operatorname{tg} \varepsilon = \frac{V_j \sin \varphi_j - V_C \sin \xi}{V_j \cos \varphi_j - V_C \cos \xi} = -\operatorname{tg} \beta, \quad V_1 = V_j \frac{\sin(\beta + \varphi_j)}{\sin \beta}.$$

Скорость элементов первичной струи V_2 по отношению к скорости движения вторичного ядра C' определяется по формуле

$$V_2 = \frac{V_j \sin \varphi_j}{\sin \beta}.$$

Таким образом, получаем выражения для скоростей вторичной струи V_J и вторичного песта V_S

$$V_J = V_1 + V_2 = V_j \left(\frac{\sin(\beta + \varphi_j)}{\sin \beta} + \frac{\sin \varphi_j}{\sin \beta} \right), \quad V_S = V_1 - V_2 = V_j \left(\frac{\sin(\beta + \varphi_j)}{\sin \beta} - \frac{\sin \varphi_j}{\sin \beta} \right).$$

Площадь поперечного сечения струи, втекающей во вторичное ядро C' , вычисляется по формуле $A = A_3 U_3 / V_2$.

Следовательно, для площадей поперечных сечений вторичной струи и вторичного песта получаем выражения

$$A_J = A(1 - \cos \beta), \quad A_S = A(1 + \cos \beta).$$

Скорости втекающих масс и энергий для вторичной струи и вторичного песта вычисляются по формулам

$$\dot{m}_J = \rho A_J V_2, \quad \dot{E}_J = \rho A_J V_2 V_J^2 / 2, \quad \dot{m}_S = \rho A_S V_2, \quad \dot{E}_S = \rho A_S V_2 V_S^2 / 2.$$

Когерентность струи. Известно, что при определенных условиях струя КЗ может представлять собой поток дискретных частиц с ненулевой радиальной скоростью, выходящих с оси симметрии КЗ. Это явление, известное как когерентная струя, исследовалось во многих работах. Предложены различные модели такой струи, хорошо согласующиеся с экспериментальными данными [11]. Согласно результатам, полученным с использованием этих моделей, угол соударения и скорость пересекающихся потоков в движущейся системе координат, связанной с ядром, являются двумя важными параметрами этого процесса. В непрерывной струе угол соударения больше некоторого определенного значения и два пересекающихся потока движутся в дозвуковом режиме. Например, для меди угол соударения приближенно равен 38° , скорость звука — примерно 4000 м/с [11].

Условия когерентности первичной струи в асимметричном КЗ V-образной формы определяются четырьмя основными параметрами: $\beta_1 - \xi - \varphi_3$, U_1 , $\beta_2 + \xi + \varphi_3$, U_2 (см. рис. 1).

В КЗ W-образной формы условия формирования когерентной вторичной струи определяются двумя основными параметрами V_2 , β (см. рис. 2).

Анализ КЗ W-образной формы: результаты и их обсуждение. В данном пункте характеристики вторичной струи, создаваемой в КЗ W-образной формы, сравниваются с характеристиками струи симметричного КЗ V-образной формы (КЗ W-образной формы состоит из двух асимметричных КЗ V-образной формы).

Характеристики симметричного КЗ V-образной формы следующие: $t_1 = t_2$, $\psi_1 = \psi_2 = 0$, $U = 5564$ м/с, $V = 2700$ м/с, $0^\circ < \alpha < 17^\circ$, $\delta V / V = 0$. Скорость струи V_j в таком КЗ есть функция α (половина угла при вершине). В этом случае струя когерентная, если $\alpha > 11^\circ$ или $\beta_1 = \beta_2 > 38^\circ$ (см. рис. 1).

В КЗ W-образной формы с асимметричными секциями V-образной формы максимальное значение угла ξ равно 17° , если в каждой V-образной секции $0 < \delta V / V < 0,42$ ($V_{01} = 2700$ м/с, $V_{02} = V_{01} + \delta V$). Таким образом, скорость вторичной струи V_J есть функция ξ ($0^\circ < \xi < 17^\circ$) (рис. 3).

Критерием когерентности в асимметричном КЗ V-образной формы (см. рис. 1, 2) является неравенство $\beta_1 - \xi - \varphi_3 > 38^\circ$ для первой пластины (см. рис. 1). Для этой пластины струя когерентна при $0 < \delta V / V < 0,14$, если $\beta_1 - \xi - \varphi_3 > 38^\circ$ и $0^\circ < \xi < 5^\circ$.

Результаты сравнения величин V_j и V_J приведены на рис. 3. Зависимость скорости массы \dot{m}_j , входящей в струю (для симметричного КЗ V-образной формы), от угла α и зависимость скорости массы \dot{m}_J , входящей во вторичную струю (для симметричного КЗ W-образной формы с асимметричными V-секциями), от угла ξ показаны на рис. 4. В широком диапазоне значений α , ξ скорость \dot{m}_J существенно больше скорости \dot{m}_j .

Соответствующие зависимости для скоростей энергий \dot{E}_J и \dot{E}_j приведены на рис. 5. Видно, что при соответствующих условиях энергия \dot{E}_J в КЗ W-образной формы больше энергии \dot{E}_j в КЗ V-образной формы.

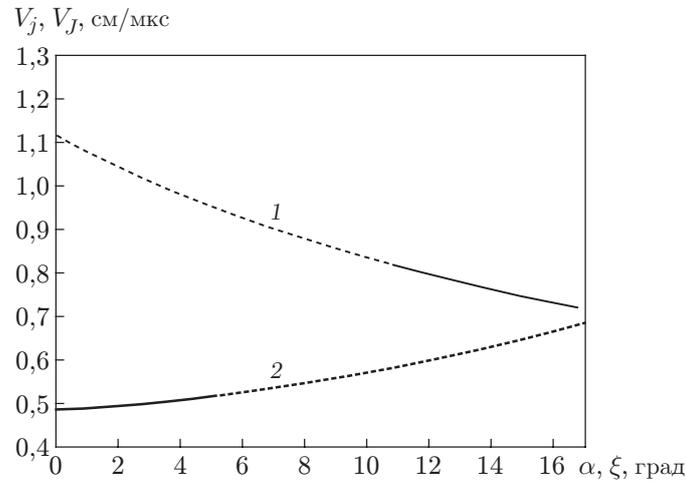


Рис. 3. Зависимости скорости первичной струи V_j от угла α в симметричной V-образной секции (1) и скорости вторичной струи V_J от угла ξ в кумулятивном заряде W-образной формы с асимметричными V-образными секциями (2): сплошные линии — когерентная струя; штриховые — некогерентная струя

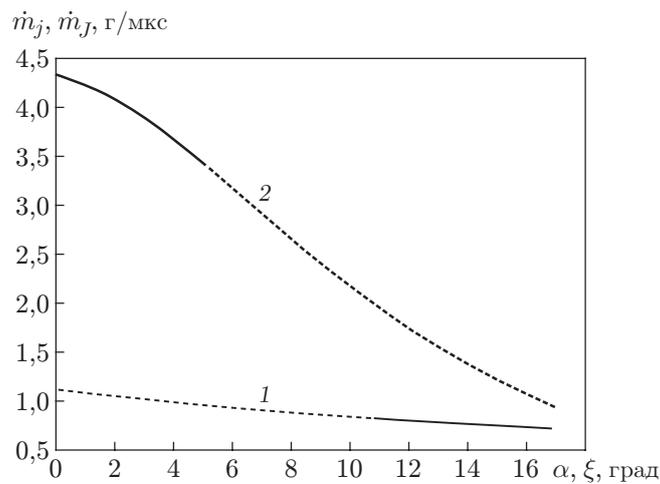


Рис. 4. Зависимости скорости входящей массы m_j от угла α в симметричной V-образной секции (1) и скорости входящей массы m_J от угла ξ в кумулятивном заряде W-образной формы с асимметричными V-образными секциями (2): сплошные линии — когерентная струя; штриховые — некогерентная струя

Заключение. В работе предложена замкнутая модель образования струи в плоском симметричном КЗ W-образной формы с асимметричными секциями V-образной формы.

В плоском симметричном КЗ W-образной формы вследствие наличия V-образных секций формируются два первичных ядра и две первичные струи.

Если КЗ имеет W-образную форму и его плоские V-образные секции полностью симметричны, то два первичных ядра будут двигаться параллельно оси симметрии. Если V-образные секции являются асимметричными, то первичные ядра формируют две первичные струи, входящие в движущееся вторичное ядро, формирующееся на оси симметрии КЗ W-образной формы.

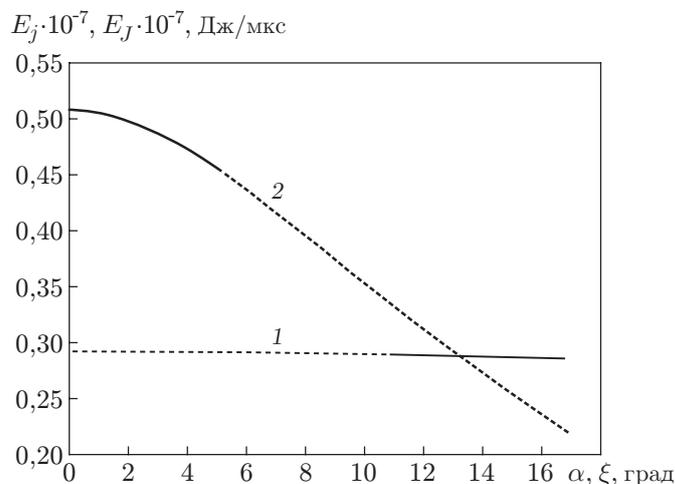


Рис. 5. Зависимости скорости поступающей энергии E_j от угла α в симметричной V-образной секции (1) и скорости поступающей энергии E_j от угла ξ в кумулятивном заряде W-образной формы с асимметричными V-образными секциями (2):

сплошные линии — когерентная струя; штриховые — некогерентная струя

Исследованы условия когерентности вторичного ядра и определены параметры, от которых зависят эти условия.

Для полностью симметричных КЗ V-образной формы энергия струи является важным параметром. В КЗ W-образной формы во вторичной струе теоретически можно получить существенно большую энергию. Предложенная модель позволяет провести сравнение скорости струи в симметричном КЗ и скорости вторичной струи в КЗ W-образной формы. Результаты сравнения показывают, что при определенных условиях скорость массы, входящей во вторичную струю в КЗ W-образной формы, в четыре раза больше, а скорость поступающей энергии в два раза больше, чем соответствующие величины в симметричном КЗ V-образной формы.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Birkhoff G., MacDougall D. P., Pugh E. M., Taylor G.** Explosives with lined cavities // J. Appl. Phys. 1948. V. 19. P. 563.
2. **Pugh E. M., Eichelberger R. J., Rostoker N.** Theory of jet formation by charges with lined conical cavities // J. Appl. Phys. 1952. V. 23. P. 532.
3. **Kinelovskii S. A., Trishin Yu. A.** Physical aspects of the hollow charge effect // Combustion, Explosion, Shock Waves. 1980. V. 16, N 5. P. 504–515.
4. **Trishin Yu. A.** Some physical problems of cumulation // J. Appl. Mech. Tech. Phys. 2000. V. 41, N 5. P. 773–787.
5. **Hirsch E.** A model for predicting the effect of shaped charge asymmetries on its penetration into monolithic steel targets // Proc. of the 8th Intern. symp. on ballistics. Orlando (USA), 1984. V. 1. P. VII-27.
6. **Mayselless M.** Experimental and computational comparison between the effects of asymmetries on peripherally initiated and point initiated shaped charge // Proc. of the 10th Intern. symp. on ballistics. San Diego (USA), 1987. V. 2, ses. V.

7. **Pack D. C., Curtis J. P.** On the effect of asymmetries on the jet from a linear shaped charge // J. Appl. Phys. 1990. V. 67. P. 6701.
8. **Cheng Wang, Fenglei Huang, Jianguo Ning.** Jet formation and penetration mechanism of W typed shaped charge // Acta Mech. Sinica. 2009. V. 25. P. 107–120.
9. **Mahdian A., Liaghat G. H., Ghayour M., et al.** A method for shaped charge design and increase its penetrability // Proc. of the 10th conf. of Iran. inst. of aerospace. Tehran: Tarbiat modares univ., 2011.
10. **Mahdian A., Liaghat G. H., Ghayour M.** Generalized closed-form model for analysis of asymmetric shaped charges // J. Appl. Mech. Tech. Phys. 2012. V. 54, N 2. P. 259–267.
11. **Kelly R. J., Curtis J. P., Cowan K. G.** An analytic model for the prediction of incoherent shaped charge jets // J. Appl. Phys. 1999. V. 86. P. 2155.

*Поступила в редакцию 13/XII 2011 г.,
в окончательном варианте — 27/XI 2012 г.*
