УДК 662.2

# ОБОБЩЕННАЯ ЗАМКНУТАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ АНАЛИЗА АСИММЕТРИЧНЫХ КУМУЛЯТИВНЫХ ЗАРЯДОВ

А. Махдиан, Дж. Х. Лиахат*, М. Гайур

Исфаханский технологический университет, 84156-83111 Исфахан, Иран
* Тарбиат модаррес университет, Тегеран, Иран
E-mails: a.mahdian@me.iut.ac.ir, ghlia530@modares.ac.ir,
ghayour@cc.iut.ac.ir

Представлена модель, имеющая меньше ограничений по сравнению с существующими моделями и описывающая явление коллапса при любой геометрической асимметрии облицовки заряда и при наличии как симметричной, так и асимметричной формы фронта волны. В модели развита наиболее полная обобщенная классическая теория формирования струй. В симметричном случае известные модели достаточно точно описывают процесс формирования струи и песта, однако асимметрия облицовки, окружающего заряда и фронта волны детонации, а также технические требования, в частности производственные допуски, могут оказывать влияние на коллапс облицовки и поведение кумулятивной струи и песта. Некоторые известные модели, описывающие асимметричные процессы, либо не являются замкнутыми, либо применимы при определенных ограничениях (таких, как малая асимметрия и плоский фронт волны). Представленная модель позволяет оценить влияние выпуклого, плоского и вогнутого фронтов волны на отклонение направления скорости струи от оси, определить другие параметры струи и песта, а также исследовать влияние асимметричного фронта волны на формирование струи в случае абсолютно симметричных облицовки и окружающего заряда.

Ключевые слова: асимметричный кумулятивный заряд, теория формирования струй, асимметричный фронт волны детонации, явление схлопывания облицовки.

**Введение.** Клиновидная облицовка (вкладыш) изготовлена из двух тонких пластин, соединенных под углом $2\alpha$. С внешней стороны облицовка окружена взрывчатым материалом. При взрыве заряда фронт детонационной волны падает на лицевую часть каждой пластины, вследствие чего элементы облицовки ускоряются. Элементы двух пластин встречаются в движущейся точке контакта, которая может быть расположена на номинальной оси симметрии облицовки. В этой точке образуются высокоскоростная плоская струя и низкоскоростной пест.

В работах [1, 2] предложена модель, описывающая поведение симметричных облицовок. Вследствие асимметрии облицовки или заряда, а также наличия других дефектов точка соударения элементов может находиться вблизи оси, при этом появляется поперечная составляющая скорости, что уменьшает глубину проникания струи.

В работе [3] предложена модель для описания асимметрии в кумулятивном заряде, но вследствие многочисленных допущений, принятых при построении модели, в последующих исследованиях она не использовалась. Позднее большое внимание уделялось исследованию формирования асимметричной струи и песта. Экспериментальные методы применяются для определения допустимых допусков при проектировании кумулятивного заряда, но они должны быть дополнены соответствующей теорией [4].

Параметры асимметрии и их влияние на глубину проникания исследованы в работе [5]. В модели, представленной в [5], основное движение струи и составляющие скорости, направленные от оси, а также струйные потоки, выходящие из точки контакта, являются важными характеристиками рассматриваемого явления. В работе [6] исследовано влияние асимметрии на инициирование кумулятивного заряда.

В работе [7] впервые предложена простая замкнутая модель Пака (Pack) — Кюртиса (Curtis) (PC-модель), являющаяся обобщением модели Биркгофа при некоторых ограничениях. Например, скорости элементов облицовки на каждой ее стороне постоянны, не меняются вдоль нее и различаются незначительно. В дальнейшем модель [7] была модифицирована за счет некоторых упрощений. В работе [8] предложены некоторые формулы для описания процесса формирования струи в трехмерном случае. В работе [9] учтено ускорение движущегося элемента. В [10] предложена другая модель и использовано понятие линии тока. Также проведены исследования столкновения двух асимметричных потоков [11–15]. В ряде исследований разрабатывались необходимые нормативы на изготовление кумулятивных зарядов [16–19]. В [20] с помощью программного обеспечения Autodyn исследовано поведение струи и песта в различных асимметричных кумулятивных зарядах.

Настоящая работа является обобщением классической теории формирования струи для линейных кумулятивных зарядов, которое позволяет описать схлопывание облицовки (коллапс) при наличии асимметрии и объяснить влияние на этот процесс симметричного и асимметричного вогнутого, выпуклого и плоского волновых фронтов [21–23].

**Схлопывание облицовки.** Рассмотрим модель схлопывания облицовки. Направим ось $x$ по номинальной оси симметрии, ось $y$ — перпендикулярно ей, начало координат расположим в вершине клина (рис. 1). Фронт клиновидной волны детонации моделируется двумя плоскими волнами, перемещающимися с постоянной скоростью $U$. Фронты волны образуют постоянные углы $\psi_1$ и $\psi_2$ с осью $y$.

Предполагается, что элементы, расположенные в точках $P_1$ и $P_2$, ускоряются мгновенно до постоянных скоростей $V_{01}$ и $V_{02}$ в направлениях $P_1C$ и $P_2C$ и встречаются в точке $C$. Схлопывание любых элементов, расположенных на обеих сторонах облицовки, не зависит

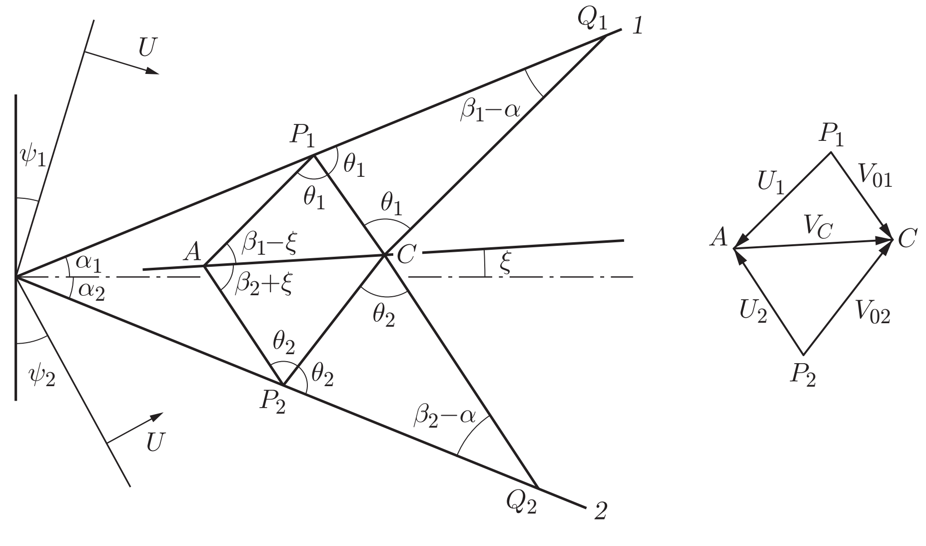


Рис. 1. Схема процесса схлопывания в кумулятивном заряде:
*1, 2* — поверхности облицовки

от соседних элементов. В течение промежутка времени, за который элементы, расположенные в точках $P_1$ и $P_2$, достигают точки $C$, элементы, расположенные на линиях $P_1Q_1$ и $P_2Q_2$, попадают на линии $CQ_1$ и $CQ_2$, параллельные линиям $AP_1$ и $AP_2$. Кроме того, в течение указанного промежутка времени точка $A$ достигает точки $C$ со скоростью $V_C$, а детонационная волна сообщает ускорение пластине 1 (или пластине 2) и перемещается из точек $P_1$ и $P_2$ в точки $Q_1$ и $Q_2$.

**Описание предложенной модели.** В основе модели лежит движение элементов, принадлежащих поверхностям 1 и 2 облицовки, и их столкновение в движущейся точке — точке стагнации (ядре). Обычно предполагается, что направление движения точки стагнации образует угол $\xi$ с номинальной осью симметрии. В предлагаемой модели не накладывается каких-либо ограничений на вид асимметрии: любой параметр асимметрии может быть учтен в модели. В частном случае ($V_{01} = V_{02}$, $\psi_1 = \psi_2 = 0$) или в случае полностью симметричного кумулятивного заряда эта модель сводится к модели Биркгофа. Для замыкания модели и получения оценки вогнутости или выпуклости фронта детонационной волны используется детонационная волна клиновидной формы. Таким образом, в простейшем случае данная модель позволяет исследовать волновые фронты, которые приходят на каждую сторону облицовки под постоянным углом.

Элементы, принадлежащие поверхностям 1 и 2 облицовки, имеют различные, но постоянные скорости $V_{01}$ и $V_{02}$. Кроме того, скорость фронта волны в направлениях $\psi_1$ и $\psi_2$ равна $U$ (см. рис. 1). Таким образом, необходимо определить следующие шесть неизвестных: углы $\beta_1$, $\beta_2$ наклона потоков элементов с поверхностей 1 и 2 к номинальной оси симметрии соответственно, углы $\theta_1$, $\theta_2$ наклона потоков элементов с поверхностей 1 и 2 к этим поверхностям, угол $\xi$ между направлением движения точки стагнации (ядра) и номинальной осью симметрии, скорость ядра $V_C$.

Для треугольников $AP_1C$ и $AP_2C$ справедливы соотношения

$$\frac{V_{01}}{\sin(\beta_1 - \xi)} = \frac{V_C}{\sin\theta_1}, \qquad \frac{V_{02}}{\sin(\beta_2 + \xi)} = \frac{V_C}{\sin\theta_2}, \tag{1}$$

а для треугольников $P_1CQ_1$ и $P_2CQ_2$ — соотношения

$$\begin{aligned} &\frac{V_{01}}{\sin(\beta_1 - \alpha_1)} = \frac{U}{\cos(\alpha_1 + \psi_1)\sin\theta_1}, \qquad \beta_1 - \alpha_1 = 180 - 2\theta_1, \\ &\frac{V_{02}}{\sin(\beta_2 - \alpha_2)} = \frac{U}{\cos(\alpha_2 + \psi_2)\sin\theta_2}, \qquad \beta_2 - \alpha_2 = 180 - 2\theta_2. \end{aligned} \tag{2}$$

Из уравнений (1), (2) можно определить следующие шесть величин:

$$\cos\theta_1 = \sin\delta_1 = \frac{V_{01}}{2U}\cos(\alpha_1 + \psi_1), \qquad \beta_1 = 180 - 2\theta_1 + \alpha_1,$$

$$\cos\theta_2 = \sin\delta_2 = \frac{V_{02}}{2U}\cos(\alpha_2 + \psi_2), \qquad \beta_2 = 180 - 2\theta_2 + \alpha_2,$$

$$\operatorname{tg}\xi = \frac{A\sin\beta_1 - \sin\beta_2}{A\cos\beta_1 + \cos\beta_2} \qquad \Big(A = \frac{\sin(\beta_2 + \xi)}{\sin(\beta_1 - \xi)} = \frac{V_{02}}{V_{01}}\,\frac{\sin\theta_2}{\sin\theta_1}\Big),$$

$$V_C = V_{02}\frac{\sin\theta_2}{\sin(\beta_2 + \xi)} = V_{01}\,\frac{\sin\theta_1}{\sin(\beta_1 - \xi)}.$$

Для определения потоков, вытекающих из ядра, при скоростях $U_1$ и $U_2$ потоков, втекающих в ядро, имеем

$$U_1 = V_{01}\cos\theta_1 + V_C\cos(\beta_1 - \xi) = V_{01}(\cos\theta_1 + \sin\theta_1/\operatorname{tg}(\beta_1 - \xi)),$$

$$U_2 = V_{02}\cos\theta_2 + V_C\cos(\beta_2 + \xi) = V_{02}(\cos\theta_2 + \sin\theta_2/\operatorname{tg}(\beta_2 + \xi)).$$

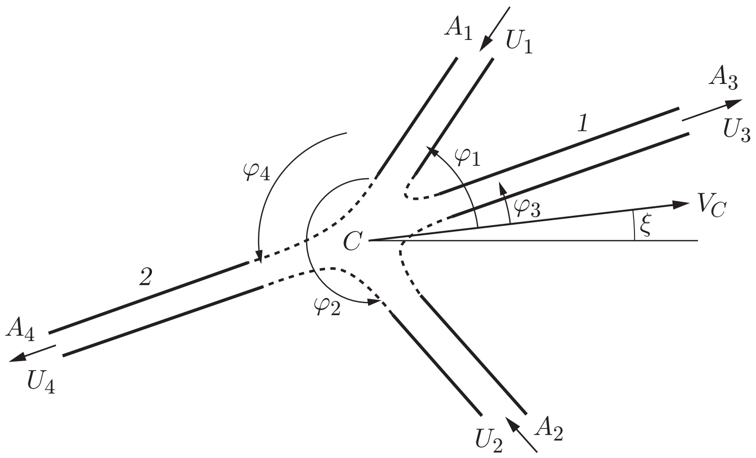


Рис. 2. Схема течения струи:
*1* — струя, *2* — пест

Направления этих двух течений по отношению к номинальной оси симметрии (углы $\beta_1$, $\beta_2$) были определены выше. Для углов между направлениями потоков и направлением движения ядра имеем следующие соотношения:

$$\varphi_1 = \beta_1 - \xi, \qquad \varphi_2 = -\beta_2 - \xi.$$

Если в интервале времени $t$ расстояния от двух поверхностей до ядра равны $S_1$ и $S_2$, то можно записать соотношение

$$\frac{A_1 U_1}{m_1 S_1} = \frac{A_2 U_2}{m_2 S_2},$$

или

$$\frac{A_1}{A_2} = \frac{m_1 S_1 U_2}{m_2 S_2 U_1},$$

где $m_1$, $m_2$ — массы на единицу длины потоков с поверхностей облицовки. Тогда площади $A_1$, $A_2$ потоков, втекающих в основной поток (в точку $C$) (рис. 2), можно найти из соотношений

$$\rho A_1 U_1 = \frac{\rho w t_1 U S_1}{S_2 \cos\alpha_1}, \qquad \rho A_2 U_2 = \frac{\rho w t_2 U}{\cos\alpha_2}$$

($t_1$, $t_2$ — толщины сторон 1 и 2 облицовки; $w$ — поперечный размер каждой стороны облицовки).

Длины путей $S_1$, $S_2$, пройденных элементами, принадлежащими поверхностям 1 и 2, до момента их столкновения через определенный промежуток времени, можно определить следующим образом. Координаты точек $P_1$, $P_2$ (см. рис. 1) есть $X_{P_1}$, $X_{P_2}$. Таким образом,

$$\frac{S_1}{S_2} = \frac{X_{P1}}{X_{P2}} = \frac{\operatorname{tg}\xi + \operatorname{tg}(\theta_1 - \alpha_1)}{\operatorname{tg}\alpha + \operatorname{tg}(\theta_1 - \alpha_1)} \, \frac{\operatorname{tg}\alpha + \operatorname{tg}(\theta_2 - \alpha_2)}{\operatorname{tg}(\theta_2 - \alpha_2) - \operatorname{tg}\xi}.$$

С помощью приведенных выше соотношений определяются величины $A_1$, $A_2$, $U_1$, $U_2$, $\varphi_1$, $\varphi_2$. Затем с использованием модели, предложенной в [8], можно определить $U_3$, $U_4$, $\varphi_3$, $\varphi_4$, $A_3$, $A_4$:

$$U_3^2 = U_4^2 = \frac{m_1 S_1 U_1^2 + m_2 S_2 U_2^2}{m_1 S_1 + m_2 S_2},$$

$$\varphi_3 = \varphi_4 - \pi = \operatorname{arctg} \frac{m_1 S_1 U_1 \sin\varphi_1 + m_2 S_2 U_2 \sin\varphi_2}{m_1 S_1 U_1 \cos\varphi_1 + m_2 S_2 U_2 \cos\varphi_2}, \qquad \varphi_4 = \varphi_3 + \pi,$$

$$A_3 = \frac{1}{2}\Big(\frac{m_1 S_1 + m_2 S_2}{U_3} - \frac{\sqrt{m_1^2 S_1^2 U_1^2 + 2 m_1 m_2 S_1 S_2 U_1 U_2 \cos(\varphi_1 - \varphi_2) + m_2^2 S_2^2 U_2^2}}{U_3^2}\Big),$$

$$A_4 = \frac{m_1 S_1 + m_2 S_2}{U_3} - A_3.$$

Наконец, для скоростей струи и песта получаем выражения

$$V_{jx} = U_3 \cos(\xi + \varphi_3) + V_C \cos\xi, \qquad V_{jy} = U_3 \sin(\xi + \varphi_3) + V_C \sin\xi,$$

$$V_{sx} = V_C \cos\xi - U_3 \cos(\xi + \varphi_3), \qquad V_{sy} = V_C \sin\xi - U_3 \sin(\xi + \varphi_3),$$

$$\varphi_j = \operatorname{arctg}(V_{jy}/V_{jx}), \qquad \varphi_s = \operatorname{arctg}(V_{sy}/V_{sx}),$$

где $V_C$ — скорость ядра в направлении $\xi$.

**Результаты исследования и их обсуждение.** Согласно PC-модели [7], если асимметрия скорости элементов, принадлежащих двум сторонам облицовки, мала, т. е. $V_{01} = V$, $V_{02} = V + \delta V$, то величины $S_2$, $\beta_2$ зависят только от вариации первого порядка скорости $V$. Следовательно,

$$\beta_2 = \beta + \delta\beta, \quad S_2 = S + \delta S \qquad (\beta_1 = \beta, \quad S_1 = S).$$

В PC-модели это предположение позволяет выразить величины $\delta\beta$, $\delta S$, $\xi$ и др. через $\beta$, $\alpha$, $V$, $\delta V$, $\psi$, $S$. Поскольку при этом пренебрегается вариациями второго порядка, данные результаты не могут быть использованы в общем случае, но в случае $\delta V \ll V$ (например, $\delta V/V \leqslant 0{,}05$) получаются вполне приемлемые результаты.

В предлагаемой модели отсутствуют указанные выше ограничения, что позволяет исследовать каждый параметр асимметрии с использованием вариаций необходимого порядка. Проведем сравнение представленной модели и PC-модели. Для этого рассмотрим следующие случаи.

Случай 1. Как и в случае, описанном в [7], задаются следующие параметры кумулятивного заряда: $m_1 = m_2$, $2\alpha = 44°$, $\psi_1 = \psi_2 = 0$, $U = 5564$ м/с, $V = 2700$ м/с, $\beta = 48°$.

Сравним результаты, полученные с использованием PC-модели и представленной модели при указанных параметрах.

Скорости элементов, принадлежащих поверхностям 1 и 2, равны $V$ и $V + \delta V$ ($0 < \delta V/V < 0{,}05$) соответственно. Таким образом, углы $\beta$ наклона потоков элементов с поверхностей 1 и 2 к номинальной оси симметрии различаются на величину $\delta\beta$, что обусловлено вариацией первого порядка величины $V$. Длине пути $S$, пройденного элементами, принадлежащими поверхности 1, до столкновения в момент времени $t$, соответствует длина пути $S + \delta S$, пройденного элементами, принадлежащими поверхности 2. Вариация $\delta S$ также соответствует вариации первого порядка скорости $V$.

В [7] определены величины $\xi$, $\varphi_3$, $V_{jx}$, $V_{jy}$, $V_{sx}$, $V_{sy}$, $\varphi_j$, $\varphi_s$. При сравнении приведенных в [7] результатов с результатами, полученными с использованием предлагаемой модели, для каждой указанной величины вводится степень различия $D_X = (X|_{\rm PC} - X)/X$ ($X$ — значение величины, соответствующее предлагаемой модели; $X|_{\rm PC}$ — значение, соответствующее PC-модели).

Очевидно, что при $\delta V = 0$, $\psi = 0$ результаты, полученные с использованием указанных моделей, совпадают. При увеличении $\delta V$ все величины будут различаться незначительно. Однако, поскольку $V_{sy} = 0$, величины $V_{sy}$ и $\varphi_s$, определенные по обеим моделям, существенно различаются и при $\delta V/V = 0{,}01$ степень различия приближенно равна 96 %.

Характеристики песта при малых значениях $\delta V/V$

| $\delta V/V$ | $V_{sy}$, м/с | $V_{sy}\vert_{\rm PC}$, м/с | $V_{sx}$, м/с | $V_{sx}\vert_{\rm PC}$, м/с | $\varphi_s$, град | $\varphi_s\vert_{\rm PC}$, град |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 0 | 0 | −563,940 | −563,940 | 0 | 0 |
| 0,01 | −0,0267 | −0,0523 | −567,050 | −563,033 | 0,002 70 | 0,005 30 |
| 0,02 | −0,2647 | −0,3694 | −570,188 | −570,087 | 0,026 60 | 0,036 94 |
| 0,03 | −0,7158 | −0,9488 | −573,334 | −573,105 | 0,071 53 | 0,094 85 |
| 0,04 | −1,3821 | −1,7989 | −576,498 | −576,087 | 0,137 30 | 0,178 90 |
| 0,05 | −2,2654 | −2,9208 | −579,680 | −579,034 | 0,223 90 | 0,289 00 |

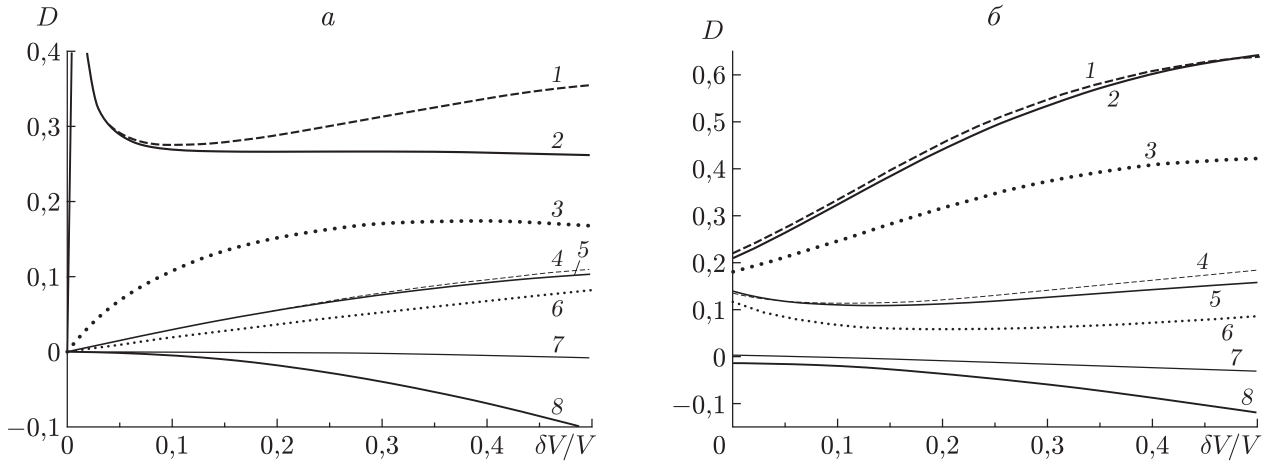


Рис. 3. Зависимость степени различия $D$ от величины $\delta V/V$ при различных значениях $\psi$:
*а* — $\psi = 0$, *б* — $\psi = 15°$; *1* — $\varphi_s$, *2* — $V_{sy}$, *3* — $\varphi_3$, *4* — $\varphi_j$, *5* — $V_{jy}$, *6* — $\xi$, *7* — $V_{jx}$, *8* — $V_{sx}$

В дальнейшем с увеличением $\delta V$ степень различия между величинами $\varphi_s|_{\rm PC}$ и $\varphi_s$, $V_{sy}|_{\rm PC}$ и $V_{sy}$ будет уменьшаться. В таблице приведены значения $V_{sy}$, $V_{sx}$, $\varphi_s$, полученные с использованием двух моделей при различных значениях $\delta V/V$. При $\delta V/V = 0{,}01$ степень различия величин $\varphi_s|_{\rm PC}$ и $\varphi$, $V_{sy}|_{\rm PC}$ и $V_{sy}$ составляет 96 %, при $\delta V/V = 0{,}05$ — 29 % (рис. 3,*а*).

В силу малости величины $V_{sx}$ степени различия величин $V_{sy}|_{\rm PC}$ и $V_{sy}$, $\varphi_s|_{\rm PC}$ и $\varphi_s$ приблизительно одинаковы. Различие величин $\varphi_j|_{\rm PC}$ и $\varphi_j$, $V_{jy}|_{\rm PC}$ и $V_{jy}$ незначительно.

Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод, что PC-модель удовлетворительно описывает поведение струи, если $\psi = 0$ и $0 < \delta V/V < 0{,}05$. В этих условиях максимальное различие характеристик струи приближенно равно 1,5 %. При $\psi = 0$, $\delta V/V = 0{,}5$ максимальное различие характеристик струи достигает 11 %.

Максимальное различие характеристик песта больше.

Случай 2. Рассматривается различие результатов расчетов, выполненных с помощью PC-модели и представленной модели, при $\psi = \psi_2 = -\psi_1 = 15°$. В этом случае, в отличие от случая 1, при $\delta V/V = 0$ степень различия соответствующих величин не равна нулю (рис. 3,*б*).

Согласно рис. 3,*б* при $\delta V/V = 0$ максимальная степень различия имеет место для характеристик песта. Например, для величины $\varphi_s$ степень различия составляет 22 %, для величины $V_{sy}$ — 21 %. Для характеристик струи степень различия меньше ($D_{\varphi_j} = 14$ %, $D_{V_{jy}} = 13{,}5$ %, $D_{V_{jx}} = 0$). При $\delta V/V = 0$, $\psi = 15°$ степень различия значений угла $\xi$ составляет приблизительно 12 %. С уменьшением $\psi$ эти различия уменьшаются, и при $\psi = 0$, $\delta V/V = 0$ все величины совпадают (рис. 4,*а*).

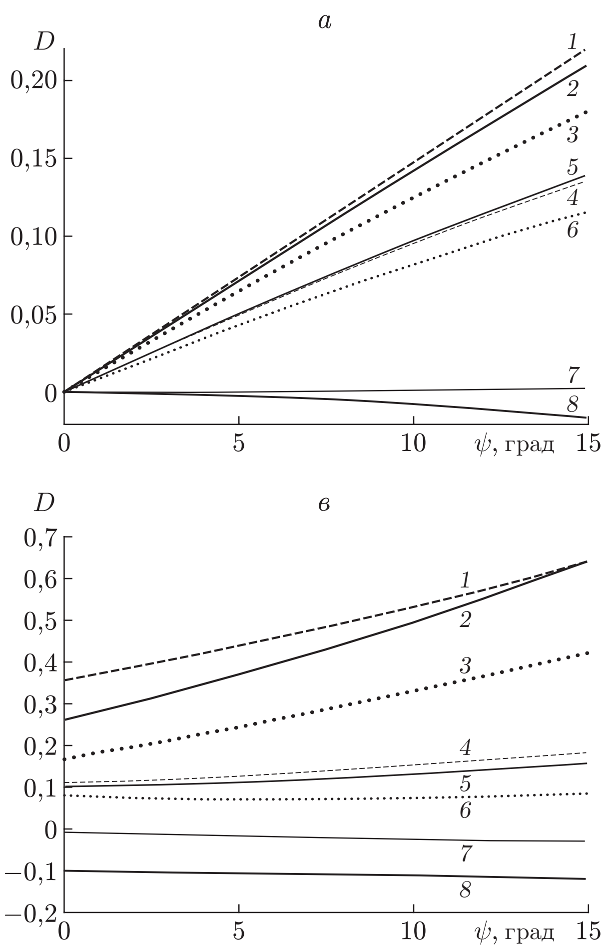


Рис. 4. Зависимость степени различия $D$ от угла $\psi$ при различных значениях $\delta V/V$:
*а* — $\delta V/V = 0$, *б* — $\delta V/V = 0{,}05$, *в* — $\delta V/V = 0{,}5$; *1* — $\varphi_s$, *2* — $V_{sy}$, *3* — $\varphi_3$, *4* — $\varphi_j$, *5* — $V_{jy}$, *6* — $\xi$, *7* — $V_{jx}$, *8* — $V_{sx}$

Иными словами, при $\psi = 0$, $\delta V/V = 0$ обе модели дают одни и те же результаты. На рис. 4,*б,в* видно, что с увеличением $\delta V/V$ немонотонность зависимости степени различия $\varphi_s$ от $\psi$ уменьшается и при $\delta V/V = 0{,}5$ эта зависимость является монотонной.

Случай 3. Предлагаемая модель описывает также различные режимы движения детонационного фронта клиновидной формы (выпуклого, плоского или вогнутого). В этой модели предполагается, что волновой фронт падает на две поверхности облицовки под разными углами $\psi_1$ и $\psi_2$ относительно оси $y$. При $\psi_2 = -\psi_1 = \psi$ эти фронты подобны плоскому волновому фронту, повернутому против часовой стрелки на угол $\psi$. Этот случай был исследован выше (случай 2).

При $\psi_1 = \psi_2 = \psi_0 > 0$ на поверхности 1 и 2 падает симметричный детонационный фронт клиновидной формы с углом при вершине $\pi - 2\psi_0$. В этом случае при $\delta V/V = 0$, $\psi_0 = 10^\circ$ (вогнутый фронт волны) скорость струи увеличивается примерно на 5 %, а при $\psi_0 = -10^\circ$ (выпуклый фронт волны) уменьшается приблизительно на 3 %.

Следует отметить, что вогнутость фронта волны детонации обусловливает уменьшение нежелательного влияния асимметрии на поведение струи.

На рис. 5 показано отношение $X|_{\psi_0\neq 0}/X|_{\psi_0=0}$ при $\psi_0 \neq 0$ и $\psi_0 = 0$. Согласно рис. 5 в случае симметричного вогнутого фронта волны ($\psi_0 > 0$) нежелательное влияние асимметрии на параметры струи $\varphi_j$ и $V_{jy}$ (отклонение направления скорости струи от плоскости симметрии) с увеличением $\psi_0$ уменьшается. В то же время в случае выпуклого фронта волны ($\psi_0 < 0$) с увеличением $|\psi_0|$ влияние асимметрии на параметры струи $\varphi_j$ и $V_{jy}$ возрастает.

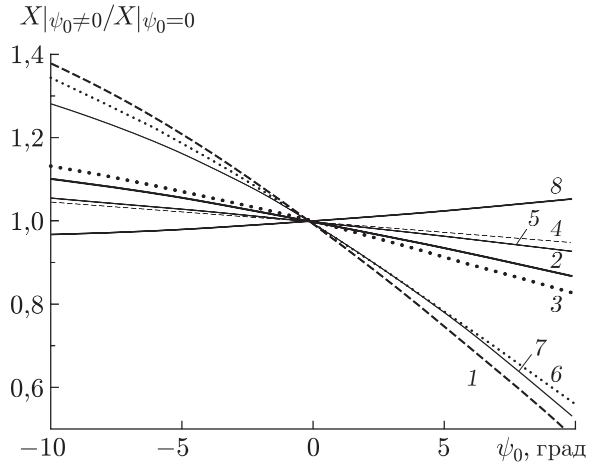


Рис. 5

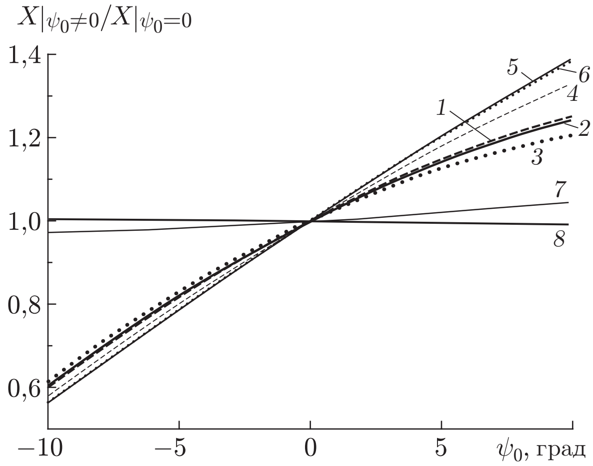


Рис. 6

Рис. 5. Влияние симметричных выпуклого, вогнутого и плоского фронтов волны на характеристики струи и песта при $\delta V/V = 0{,}5$, $-10^\circ < \psi_0 < 10^\circ$: *1* — $\varphi_s$, *2* — $V_{sy}$, *3* — $\varphi_3$, *4* — $\varphi_j$, *5* — $V_{jy}$, *6* — $\xi$, *7* — $V_{jx}$, *8* — $V_{sx}$

Рис. 6. Влияние асимметричных выпуклого, вогнутого и плоского фронтов волны на характеристики струи и песта при $\delta V/V = 0$, $-10^\circ < \psi_0 < 10^\circ$, $\Delta\psi = 1^\circ$: *1* — $\varphi_s$, *2* — $V_{sy}$, *3* — $\varphi_3$, *4* — $\varphi_j$, *5* — $V_{jy}$, *6* — $\xi$, *7* — $V_{jx}$, *8* — $V_{sx}$

Случай 4. С помощью предлагаемой модели можно исследовать влияние асимметрии волнового фронта (вогнутого, плоского, выпуклого) на характеристики струи и песта.

С использованием величины $\Delta\psi$, характеризующей поворот первоначально симметричного волнового фронта ($\psi_1 = \psi_2 = \psi_0$), можно исследовать поведение асимметричных вогнутого ($\psi_0 > 0$), плоского ($\psi_0 = 0$) и выпуклого ($\psi_0 < 0$) волновых фронтов.

На рис. 6 видно, что в случае абсолютно симметричной облицовки при $\Delta\psi = 1^\circ$ и $-10^\circ < \psi_0 < 10^\circ$ отношение значений всех величин при $\psi_0 > 0$ к их значениям при $\psi_0 = 0$ больше единицы, а при $\psi_0 < 0$ меньше единицы.

Иными словами, в случае абсолютно симметричной облицовки асимметричный плоский фронт волны более предпочтителен, чем асимметричный вогнутый фронт волны, и менее предпочтителен, чем асимметричный выпуклый фронт волны.

График зависимости степени различия величины $V_{sx}$ от $\psi_0$ на рис. 6 качественно отличается от графиков зависимостей других величин, что, как правило, не очень существенно.

На рис. 7 приведены зависимости отношений $X|_{\psi_0\neq 0}/X|_{\psi_0=0}$ для величин $\varphi_j$ и $\varphi_s$. Из рис. 7 следует, что для двух углов поворота фронта волны $\Delta\psi = 1, 5^\circ$ в интервале $-10^\circ < \psi_0 < 10^\circ$ абсолютное значение отношения $X|_{\psi_0\neq 0}/X|_{\psi_0=0}$ увеличивается с увеличением $\psi_0$ при $\psi_0 > 0$ и уменьшается с уменьшением отрицательных значений $\psi_0$.

Результаты сравнения представленной модели с РС-моделью (в случаях 1 и 2) показывают, что характеристики струи $\varphi_j$, $V_{jy}$, $V_{jx}$ в РС-модели отличаются от тех же характеристик, полученных с использованием данной модели, менее чем на 5 %, если $0 < \delta V/V < 0{,}05$ и $0 < \psi < 5^\circ$. Однако при этих условиях характеристики песта различаются значительно, но, поскольку характеристики струи более существенны, характеристики песта могут не учитываться.

Таким образом, в случае рассмотренной выше асимметрии использование РС-модели не будет приводить к ошибочным результатам для характеристик струи.

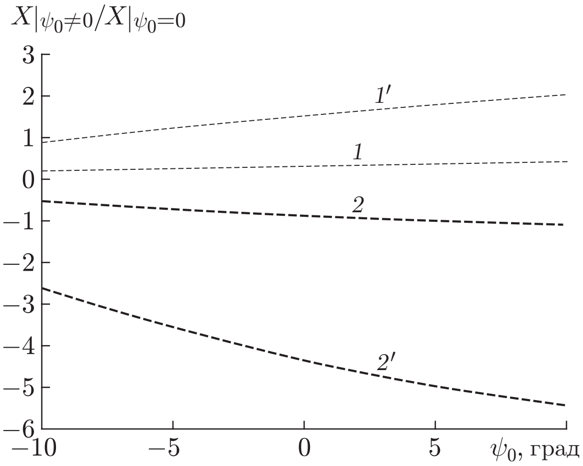


Рис. 7. Влияние величин $\psi_0$ и $\Delta\psi$ для асимметричных выпуклого, вогнутого и плоского фронтов волны на направление движения струи и песта:
*1, 1′* — $\varphi_j$, *2, 2′* — $\varphi_s$; *1, 2* — $\Delta\psi = 1°$, *1′, 2′* — $\Delta\psi = 5°$

В случае 3 для симметричного вогнутого фронта волны влияние асимметрии уменьшается. Например, при $\delta V/V = 0{,}05$ и симметричном вогнутом фронте волны $(180 - 2\psi_0$ и $\psi_0 = 10°)$ величина $\delta V$, характеризующая асимметрию, уменьшается на 15–50 %.

Однако в случае абсолютно симметричной облицовки (случай 4) если форма детонационной волны асимметрична, то нежелательное влияние асимметричного плоского фронта волны менее существенно по сравнению с влиянием асимметричного вогнутого фронта и более существенно по сравнению с влиянием асимметричного выпуклого фронта.

**Заключение.** В работе представлена замкнутая модель формирования струи в асимметричном кумулятивном заряде, которая является обобщением классической теории Биркгофа. С помощью этой модели можно объяснить поведение симметричного и асимметричного фронтов детонационной волны, а также влияние вогнутой, плоской и выпуклой волн детонации на процесс образования кумулятивной струи и песта.

## 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. **Aseltine C. L.** Analytical prediction of the effect of warhead assymmetries on shaped charge performance // Proc. of the 4th Intern. symp. on ballistics. Montery (USA), 17–19 Oct. 1978. V. 1. P. V-4.
4. **Yiu S. K.** Experimental study of the effects of asymmetric variations of an explosive device // Proc. of the 8th Intern. symp. on ballistics. Orlando (USA), 1984. V. 1. P. VI-41.
5. **Hirsch E.** A model for predicting the effect of shaped charge asymmetries on its penetration into monolythic steel targets // Proc. of the 8th Intern. symp. on ballistics. Orlando (USA), 1984. V. 1. P. VII-27.
6. **Mayseless 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. **Brown J., Curtis P., Cook D.** The formation of jets from shaped charges in the presence of asymmetry // J. Appl. Phys. 1992. V. 72. P. 2136.
9. **Kelly R. J., Curtis J. P., Bremer M.** On analytic modeling of casing and liner thickness variations in a shaped charge // J. Appl. Phys. 1993. V. 75. P. 96.
10. **Heider N., Rottenkolber E.** Analysis of the asymmetric jet formation process in shaped charges // Proc. of the 14th Intern. symp. on ballistics. Québec (Canada), 1993. V. 2. P. 203.
11. **Curtis J. P., Kelly R. J.** Circular streamline model of shaped charge jet and slug formation with asymmetry // J. Appl. Phys. 1994. V. 75. P. 7700.
12. **Curtis J. P.** Asymmetric formation of shaped charge jets // Proc. of the 17th Intern. symp. on ballistics. Midrand (South Africa), 1998. V. 2. P. 405.
13. **Mordehai D., Hirsch E.** The problem of two flow collision — a generalized extension to the basic model // Proc. of the 20th Intern. symp. on ballistics. Orlando (USA), 2002. V. 1. P. 478.
14. **Shi Yi-Na, Qin Cheng-Sen.** Theoretical prediction of asymmetrical jet formation in two metallic flow collision // Chinese Phys. Lett. 2007. V. 24. P. 2281.
15. **Arnold W., Rottenkolber E.** Penetrator / shaped charge system. Pt 1. Simulation of asymmetrical effects // Proc. of the 23rd Intern. symp. on ballistics. Tarragona (Spain), 2007. V. 2. P. 263.
16. **Brown J.** Quantitative study of permissible tolerances in shaped charges // Proc. of the 16th Intern. symp. on ballistics. San Francisco (USA), 1996. V. 2. P. 483.
17. **Schmeidewind P., Majerus M., Lewis S., et al.** Quantification of small dimensional variations on the performance of a small caliber shaped charge // Proc. of the 16th Intern. symp. on ballistics. San Francisco (USA), 1996. V. 2. P. 503.
18. **Brown J., Softley I. D., Edwards P.** Experimental study of shaped charges with built-in asymmetries // Propellants, Explosives, Pyrotechnics. 1993. V. 18, iss. 5. P. 255.
19. **Brown J., Edwards P. J., Lee P. R.** Studies of shaped charges with built-in asymmetries. Pt 2. Modeling // Propellants, Explosives, Pyrotechnics. 1996. V. 21, iss. 2. P. 59.
20. **Ayisit O.** The influence of asymmetries in shaped charge performance // Intern. J. Impact Engng. 2008. V. 35, iss. 12. P. 1399.
21. **Owshani S.** Analysis and simulation of jet formation in shaped charges and its penetration. Master sci. thesis. Tehran: Tarbiat modares univ., 1994.
22. **Rashidi M.** Theory of explosion and jet formation in shaped charge. Master sci. thesis. Tehran: Tarbiat modares univ., 1996.
23. **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. instit. of aerospace. Tehran: Tarbiat modares univ., 2011.


*Поступила в редакцию 19/VII 2011 г.,*
*в окончательном варианте — 13/XII 2011 г.*