

# ПАРАЛЛЕЛЬНАЯ КУМУЛЯЦИЯ НА ОСНОВЕ МНОГОЛАЙНЕРНЫХ СИСТЕМ

*В.И. Чумаков, А.В. Столярчук*

*Харьковский национальный университет радиоэлектроники*

*Харьков, Украина*

*E-mail: chumakov@kture.kharkov.ua*

Рассмотрены методы повышения эффективности магнитокумулятивных систем. Показаны преимущества систем на основе коаксиальных лайнеров, с точки зрения достижения максимального коэффициента преобразования энергии взрывчатого вещества в кинетическую энергию лайнера.

PACS: 52.80.Nc

Химические взрывчатые вещества являются наиболее привлекательными источниками энергии для компрессионных систем как в связи с высокими удельными плотностями энергии, так и в отношении выделяемой мощности [1]. Выделяемую при взрыве химическую энергию можно просто и с высокой эффективностью преобразовать в кинетическую энергию металлической пластины, которая обычно называется «лайнером» и является основным элементом всех компрессионных систем.

Рассмотрим процесс ускорения тонкой несжимаемой пластины детонационной волной [2]. Предлагаемое ниже решение для несжимаемых пластин удовлетворительно описывает движение только сравнительно тонких пластин, так как для более толстых пластин вся картина движения существенно иная и зависит от ее сжимаемости (волновые процессы в пластине). Уравнение состояния продуктов взрыва (ПВ) считаем кубическим.

$$(U_{nl})_{np} = \frac{27}{16} \frac{m}{\rho_{ОВВ} l} D \frac{H}{\theta} \left( 1 + \frac{16}{27} \frac{\rho_{ОВВ} l}{m} \frac{H}{\theta} \right)^{-1/3} \sqrt{1 + \frac{32}{27} \frac{\rho_{ОВВ} l}{m} \frac{H}{\theta}}, \quad (1)$$

где  $(U_{nl})_{np}$  – предельная скорость пластины;  $m$  – масса пластины;  $\rho_{ОВВ}$  – плотность взрывчатого вещества (ВВ);  $l$  – длина заряда.

Обозначив отношение массы заряда ВВ к массе пластины  $\frac{\rho_{ОВВ} l}{m} = \mu$  окончательно получаем:

$$\frac{(U_{nl})_{np}}{D} = \frac{27}{16\mu} \frac{H}{\theta} \left( 1 + \frac{16}{27} \mu \right)^{-1/3} \sqrt{1 + \frac{32}{27} \mu \frac{H}{\theta}}. \quad (2)$$

Определим эффективность преобразования энергии взрыва в кинетическую энергию ускоренной пластины. Для этого вычислим, какую долю энергии ВВ получает пластина в результате взрыва. Энергия взрыва ВВ

$$E_{ВВ} = \rho_{ОВВ} l \frac{D^2}{16} \quad (3)$$

(энергией единицы массы ВВ считаем  $\frac{D^2}{16}$ ).

Кинетическая энергия пластины

$$E_{nl} = m \frac{(U_{nl})_{np}^2}{2}. \quad (4)$$

Отсюда доля энергии ВВ, получаемая пластиной,

$$\varphi = \frac{E_{nl}}{E_{ВВ}} = \frac{m(U_{nl})_{np}^2}{2\rho_{ОВВ} l \frac{D^2}{16}} = \frac{8}{\mu} \frac{H}{\theta} \frac{(U_{nl})_{np}^2}{D^2}$$

$$\text{или} \quad \varphi = \frac{27^2}{32\mu} \frac{H}{\theta} \left( 1 + \frac{16}{27} \mu \right)^{-2/3} \sqrt{1 + \frac{32}{27} \mu \frac{H}{\theta}}^2$$

Величина  $\varphi(\mu)$  имеет максимум при  $\varphi = \frac{81}{32} = 2,53$ ,

при этом  $\varphi_{\max} = \frac{16}{3} \frac{H}{\theta} = 0,351$  и  $\frac{(U_{nl})_{np}}{D} = \frac{1}{3}$

Таким образом, наибольшее количество энергии получает пластина, масса которой в 2,53 раза меньше массы ВВ. Доля получаемой при этом энергии составляет 35,1%.

Применим вышеизложенные формулы для расчета разлета цилиндрического металлического лайнера под воздействием продуктов взрыва ВВ, заполняющего его внутреннюю полость.

Лайнер представляет собой полый металлический цилиндр длиной  $l$ , внешним радиусом  $r$  и толщиной стенок  $d$ . Масса лайнера определяется формулой

$$m_l = \rho_l l \pi (r^2 - (r-d)^2), \quad (5)$$

где  $\rho_l$  – плотность материала, из которого изготовлен лайнер.

Полый цилиндрический лайнер вмещает в себя заряд ВВ массой

$$m_{\text{exp}} = \rho_{\text{exp}} l \pi (r-d)^2. \quad (6)$$

Таким образом, отношение массы ВВ к массе лайнера

$$\mu = \frac{m_{\text{exp}}}{m_l} = \frac{\rho_{\text{exp}}}{\rho_l} \frac{1}{r^2 - (r-d)^2}. \quad (7)$$

Кинетическая энергия, которую приобретет лайнер в результате ускорения продуктами взрыва, с учетом формул (2, 5 и 7), определяется зависимостью вида

$$E = \frac{m_l U_l^2}{2} = \frac{\rho_l \pi (2rd - d^2)}{2} D \frac{27}{16 \frac{\rho_{\text{exp}}}{\rho_l} \frac{1}{r^2} - 1} + \frac{16 \rho_{\text{exp}}}{27 \rho_l} \frac{1}{r^2} - 1 \sqrt{1 + \frac{32 \rho_{\text{exp}}}{27 \rho_l} \frac{1}{r^2} - 1} \quad (8)$$

На Рис.1 построена зависимость кинетической энергии лайнера, как функция начального радиуса. Здесь же показан рост массы лайнера и отношение масс  $\mu$ , для чего необходимо выразить радиус лайнера как функцию отношения масс ВВ и лайнера  $\mu$ .

$$r = \frac{d(\rho_{\text{exp}} + \rho_l \mu + \sqrt{\rho_l \mu} \sqrt{\rho_{\text{exp}} + \rho_l \mu})}{\rho_{\text{exp}}} \quad (9)$$

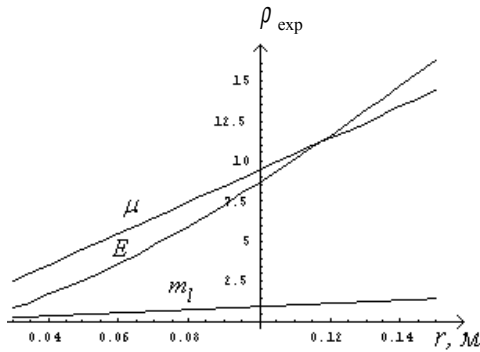


Рис.1. Масса лайнера (кг), кинетическая энергия лайнера (МДж), отношение ( $\mu$ ) в зависимости от начального радиуса лайнера (м)

Наибольшая эффективность передачи энергии взрыва ускоряемому телу достигается при  $\mu = 2,53$ . При этом формула (9) принимает вид

$$r = \frac{d}{\rho_{\text{exp}}} \left( 2,53 \rho_l + 2,53 \sqrt{\rho_l (\rho_l + 0,395 \rho_{\text{exp}})} + 1 \right) \quad (10)$$

При увеличении начального радиуса лайнера (а соответственно  $\mu$  и  $m_l$ ), его кинетическая энергия увеличивается, но так как рост конечной скорости лайнера замедляется (имеет место асимптотическое приближение к свободной скорости разлета продуктов взрыва), то КПД всей системы падает. ВВ, масса которого превышает  $2,53 m_l$ , используется неэффективно. Исходя из этого, логично предположить такую конструкцию, в которой излишки ВВ ( $m_{\text{exp}} > 2,53 m_l$ ) используются для разгона второго лайнера.

Конструкция, основы которой были изложены в выводах предыдущего раздела, была разработана в [3]. На Рис. 2 представлена коаксиальная цилиндрическая лайнерная система, в конструкции которой реализована идея разгона двух лайнеров единым зарядом ВВ.

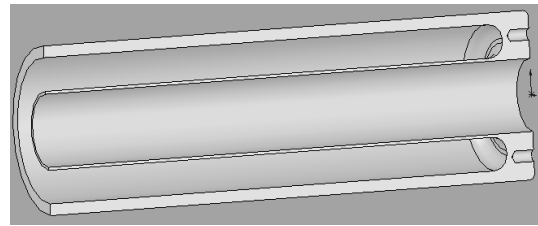


Рис.2. Двухлайнерная кумулятивная система

Двухлайнерная система представляет собой частный случай многолайнерной системы, общие принципы построения которой будут изложены по ходу.

Двухлайнерная система представляет собой коаксиально расположенные цилиндрические лайнеры длиной  $l$ , радиусом  $r_1, r_2$  и толщиной стенок  $d_1$  и  $d_2$ , соответственно. Пространство между лайнерами заполняется ВВ.

Массы первого и второго лайнеров равны  $m_{l1} = \rho_l \pi (r_1^2 - (r_1 - d_1)^2)$ ,  $m_{l2} = \rho_l \pi (r_2^2 - (r_2 - d_2)^2)$ .

Таким образом, суммарная масса лайнеров системы равна:

$$m_{\Sigma} = \rho_l \pi \left( r_1^2 - (r_1 - d_1)^2 + r_2^2 - (r_2 - d_2)^2 \right) \quad (11)$$

Масса заряда ВВ, который может разместиться в лайнерной системе заданной геометрии, определяется формулой  $m_{\text{exp}} = \rho_{\text{exp}} \pi \left( (r_2 - d_2)^2 - r_1^2 \right)$ . Отсюда отношение массы ВВ к массе лайнеров для двухлайнерной системы составляет:

$$\mu = \frac{m_{\text{exp}}}{m_{l1} + m_{l2}} = \frac{\rho_{\text{exp}}}{\rho_l} \frac{(r_2 - d_2)^2 - r_1^2}{r_1^2 - (r_1 - d_1)^2 + r_2^2 - (r_2 - d_2)^2} \quad (12)$$

Выразим из (12)  $r_2$

$$r_2 = \frac{\rho_{\text{exp}} d_2 + \rho_l d_2 \mu + \sqrt{\rho_l^2 d_2^2 \mu^2 + \rho_{\text{exp}}^2 r_1^2 + \rho_l \rho_{\text{exp}} \mu (d_2^2 - d_1^2 + 2d_1 r_1)}}{\rho_{\text{exp}}} \quad (13)$$

Максимальная эффективность использования энергии взрыва достигается при  $\mu = 2,53$ . Отсюда

$$r_2 = \frac{\rho_{\text{exp}} d_2 + 2,53 \rho_l d_2 + \sqrt{6,4 \rho_l^2 d_2^2 + \rho_{\text{exp}}^2 r_1^2 + 2,53 \rho_l \rho_{\text{exp}} (d_2^2 - d_1^2 + 2d_1 r_1)}}{\rho_{\text{exp}}} \quad (14)$$

Найдем кинетическую энергию лайнерной системы. Здесь  $m_{\Sigma}$  — суммарная масса первого и второго лайнеров, а их скорости равны между собой. Пред-

положение о равенстве скоростей справедливо в том случае, если инициирование взрыва происходит в

слое ВВ, делящего всю массу заряда так, что выполняется условие  $\mu = 2,53$  для обоих лайнеров.

$$E_2 = \frac{m_{\text{л}} U_l^2}{2} = \frac{\rho_l \pi \left( r_1^2 - (r_1 - d_1)^2 + r_2^2 - (r_2 - d_2)^2 \right)}{2} D \cdot \frac{16 \frac{\rho_{\text{exp}}}{\rho_l} \frac{(r_2 - d_2)^2 - r_1^2}{r_1^2 - (r_1 - d_1)^2 + r_2^2 - (r_2 - d_2)^2}}{27} \quad (15)$$

$$\frac{1}{3} \frac{\rho_{\text{exp}}}{\rho_l} \frac{(r_2 - d_2)^2 - r_1^2}{r_1^2 - (r_1 - d_1)^2 + r_2^2 - (r_2 - d_2)^2} \sqrt{1 + \frac{32 \frac{\rho_{\text{exp}}}{\rho_l} \frac{(r_2 - d_2)^2 - r_1^2}{r_1^2 - (r_1 - d_1)^2 + r_2^2 - (r_2 - d_2)^2}}{27}}$$

Немалый практический интерес представляет сравнительный анализ по показателю кинетической энергии лайнера и лайнерной системы.

Проведем численный эксперимент со следующими исходными данными: материал лайнера – алюминий,  $\rho_l = 2700 \text{ кг/м}^3$ , ВВ – тротил,  $\rho_{\text{exp}} = 1600 \text{ кг/м}^3$ ; толщина стенки наружного лайнера  $d_2 = 3 \dots 5 \text{ мм}$ , толщина стенки внутреннего лайнера  $d_1 = 0,5 \dots 1,5 \text{ мм}$ , начальный радиус внутреннего лайнера  $r_1 = 10 \dots 25 \text{ мм}$ , начальный радиус наружного лайнера  $r_2 = 30 \dots 250 \text{ мм}$ . Значения кинетической энергии приведены к единице длины лайнера, скорость детонации  $D = 7500 \text{ м/с}$ . Результаты численного эксперимента приведены в таблице.

Сравнительный анализ энергетического преимущества двухлайнерной системы над простым лайнером показал наличие максимума, после которого значение  $E_2/E_1$  снижается, несмотря на дальнейшее увеличение начального радиуса лайнера. Отчасти это связано с нехваткой массы лайнера, так как при росте начального радиуса лайнера отношение масс ВВ и лайнера также растет, а эффективность использования энергии ВВ, начиная с некоторого значения радиуса, падает. Кроме того, исследование формулы кинетической энергии показали, что с энергетической точки зрения выгодней наращивать массу лайнера, а для лайнерной системы максимальной эффективности показатель  $\mu$  надо удерживать на отметке 2,53. При рассмотрении частного случая при  $\mu = 2,53$  выяснилось, что начальный радиус лайнерной системы больше начального радиуса лайнера ( $r_2 > r$ ). Это связано с тем, что внутренний лайнер вытесняет своим объемом некоторую массу ВВ, уменьшая тем самым  $\mu$  и для его увеличения приходится наращивать начальный радиус  $r_2$ . Таким образом, увеличение начального радиуса внутреннего лайнера имеет положительный момент, связанный с увеличением суммарной массы лайнерной системы  $m_{\text{л}}$ , но сам объем внутреннего лайнера используется не эффективно, а точнее совсем не используется.

Рассмотрим конструкцию коаксиальной цилиндрической многолайнерной системы, лишенной перечисленных выше недостатков двухлайнерной системы (рис.3). Увеличение начального радиуса

внутреннего лайнера двухлайнерной системы является вынужденной мерой, призванной увеличить суммарную массу лайнеров до значения, необходимого для достижения требуемой величины кинетической энергии системы. При этом, как показал численный эксперимент, выполнить требования для эффективной лайнерной системы ( $\mu = 2,53$ ) практически невозможно.

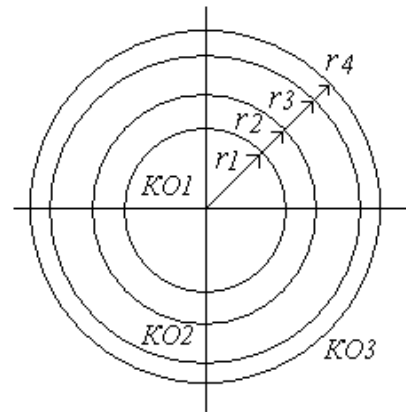


Рис.3. Многолайнерная кумулятивная система

В отличие от этого, расчет многолайнерной системы построен по совсем другому принципу. Здесь начальный радиус внутреннего лайнера определяется устройством, которое строится на основании многолайнерной системы, либо какими-нибудь другими требованиями, в том числе и технологическими и никак не связывается с его массой. Требуемая же суммарная масса лайнеров  $m_{\text{л}}$  набирается за счет их количества и размеров. При таком подходе очень легко реализуется требование  $\mu = 2,53$ , положенное в основу построения лайнерных систем максимальной эффективности.

Рассмотрим принцип работы многолайнерной системы. Нумерацию лайнеров будем вести изнутри наружу. Концепцию построения и принцип функционирования многолайнерной системы будем рассматривать на примере четырехлайнерной системы (4ЛС). 4ЛС состоит из четырех коаксиально расположенных цилиндрических лайнеров. Заряд ВВ размещается в пространстве между лайнерами, причем заполнение межлайнерного пространства ведется через один, перемежаясь с незаполненными промежутками. Наличие свободного пространства необходимо для обеспечения возможности разлета лайнеров, а также для образования компрессионного

объема, используемого при проведении эксперимента. Таким образом, количество лайнеров должно быть четным. По необходимости, заполнение взрывчатым веществом может начинаться как с полости первого лайнера и далее через один межлайнерный промежуток, так и начиная с первого межлайнерного промежутка. Выбор того или иного варианта диктуется, прежде всего, условиями проведения эксперимента, однако второй вариант в большинстве случаев является более предпочтительным. Во-первых,

есть возможность создать дополнительный компрессионный объем между внешним лайнером и окружающими элементами конструкции, а во-вторых, первый лайнер под воздействием взрыва будет схлопываться. Достоинства схлопывающихся лайнеров и сопутствующих при этом эффектов будут рассмотрены ниже. Поэтому в рассматриваемом примере ВВ закладывается между 1-м и 2-м и между 3-м и 4-м лайнерами, т.е. в 1-й и 3-й межлайнерные промежутки.

$r_2$ , мм	$E_1$ , МДж	$E_2$ , МДж	$E_2/E_1$	$\mu_1$	$\mu_2$
$r_1 = 10 \text{ мм } d_1 = 0,5 \text{ мм } d_2 = 3 \text{ мм}$					
30	4.522	3.871	0.85601	2.53	2.06
70	23.817	23.625	0.99193	6.47	6.18
110	50.480	50.574	1.00186	10.42	10.18
150	81.351	81.640	1.00355	14.37	14.15
<b>190</b>	<b>115.044</b>	<b>115.478</b>	<b>1.00377</b>	<b>18.32</b>	<b>18.11</b>
230	150.802	151.350	1.00364	22.27	22.07
$r_1 = 15 \text{ мм } d_1 = 0,5 \text{ мм } d_2 = 3 \text{ мм}$					
30	4.522	3.006	0.66481	2.53	1.61
70	23.817	23.235	0.97555	6.47	5.93
110	50.480	50.432	0.99905	10.42	9.99
150	81.351	81.650	1.00368	14.37	13.99
190	115.044	115.594	1.00478	18.32	17.97
<b>220</b>	<b>141.698</b>	<b>142.397</b>	<b>1.00493</b>	<b>21.28</b>	<b>20.95</b>
230	150.802	151.545	1.00493	22.27	21.94
$r_1 = 20 \text{ мм } d_1 = 1 \text{ мм } d_2 = 5 \text{ мм}$					
30	3.593	0.772	0.21491	1.35	0.42
70	25.511	23.500	0.92116	3.71	3.17
110	59.653	58.714	0.98426	6.08	5.65
150	101.366	101.215	0.99851	8.45	8.07
190	148.356	148.810	1.00306	10.82	10.47
230	199.298	200.236	1.00471	13.19	12.86
<b>250</b>	<b>225.974</b>	<b>227.122</b>	<b>1.00508</b>	<b>14.37</b>	<b>14.05</b>
$r_1 = 25 \text{ мм } d_1 = 1,5 \text{ мм } d_2 = 5 \text{ мм}$					
30	3.593	-	-	1.35	-
70	25.511	22.269	0.87293	3.71	2.85
110	59.653	58.275	0.97689	6.08	5.37
150	101.366	101.376	1.00009	8.45	7.81
190	148.356	149.438	1.00730	10.82	10.22
230	199.298	201.245	1.00977	13.19	12.62
<b>250</b>	<b>225.974</b>	<b>228.296</b>	<b>1.01028</b>	<b>14.37</b>	<b>13.82</b>

Принцип работы 4ЛС не сильно отличается от двухлайнерного, однако имеются свои особенности. Так, в связи с тем, что в 4ЛС заряд ВВ делится на две части, необходимо использовать две группы детонаторов. Причем должна быть решена задача высокоточной синхронизации инициирования как обеих групп, так и детонаторов внутри группы, для обеспечения симметрии процесса деформации лайнеров под воздействием продуктов взрыва.

После инициирования обоих зарядов, в 4ЛС начинают развиваться следующие процессы. Под воздействием продуктов взрыва, образовавшихся в результате взрывного разложения ВВ 1-го заряда, лайнеры 1 и 2 претерпевают радиальное сжатие и разлет соответственно, т.е. ведут себя, как вышеописанная двухлайнерная система. Лайнеры 3 и 4 также испытывают сжатие и разлет, ограничения для них

совсем иные. Рассмотрим вначале различия для четных лайнеров, претерпевающих разлет. Лайнер 4 будет тормозиться об окружающие элементы конструкции, в то время, как лайнер 2 погасит свою энергию при столкновении с лайнером 3, который движется ему навстречу с той же скоростью. Различия в процессах сжатия лайнеров 1 и 3 также очевидны. Если лайнер 1 под воздействием продуктов взрыва схлопывается практически до нулевого радиуса, то лайнер 3 прекратит свое движение после встречного столкновения с лайнером 2. Так выглядит упрощенная идеализированная схема работы 4ЛС без учета всевозможных явлений, негативно влияющих на устойчивость динамики движения лайнеров и на их конечную энергию.

Как было сказано выше, за счет использования окружающих элементов конструкции, можно полу-

чить дополнительный компрессионный объем и, таким образом, в 4ЛС их насчитывается 3. Нумерацию компрессионных объемов (КО) также будем вести изнутри наружу. 1-й и 3-й КО здесь повторяют двухлайнерную систему. Энергия, вкладываемая в 1-й КО, состоит из энергии сжатия 1-го лайнера, в 3-й КО вкладывается энергия разлета 4-го лайнера. А вот энергия 2-го КО складывается из кинетической энергии разлета 2-го и сжатия 3-го лайнеров. Поэтому во 2-м КО происходит наибольшая концентрация энергии. Кроме того, за счет встречного движения лайнеров 2 и 3 радиальное сокращение здесь происходит с удвоенной скоростью.

Таким образом, если конструкция на основе 4ЛС предполагает последующее либо прямое сум-

мирование энергии, вкладываемой лайнерами в КО, то преимущество многолайнерных систем очевидно.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Г.Ф. Кнопфель. *Сверхсильные импульсные магнитные поля*. М.: «Мир», 1972,-392.
2. Е.И. Забабахин. *Некоторые вопросы газодинамики взрыва*. Снежинск, 1997, 207с.
3. В.И. Чумаков, А.В. Столярчук. Принципы создания комплексированного ВМГ // *Сб. научн. трудов 2-го Международного радиоэлектронного Форума "Прикладная радиоэлектроника. Состояние, перспективы развития"*. 2005, Т. VI. Харьков, АН ПРЭ, ХНУРЭ, 2005. с.92-95.

#### PARALLEL CUMULATION ON A BASIS MANY LINERS OF SYSTEMS

*V.I. Chumakov, A.V. Stolarchuk*

Methods of raising of magnetocumulative systems efficiency are observed. Advantages of systems on the basis of coaxial liners are shown, from the point of view of achievement of the peak coefficient of transformation of energy of explosive in a kinetic energy of the liner.

#### ПАРАЛЕЛЬНА КУМУЛЯЦІЯ НА ЗАСАДІ БОГАТОЛАЙНЕРНИХ СИСТЕМ

*В.И. Чумаков, А.В. Столярчук*

Розглянуто методи підвищення ефективності магнітокумулятивних систем. Показано переваги систем на основі коаксіальних лайнерів, з точки зору досягнення максимального коефіцієнту перетворення енергії вибухової речовини в кінетичну енергію лайнера.