

Определение энергии кумулятивной струи различными способами

© В.И. Васюков, Ю.М. Дильдин, С.В. Ладов, С.В. Федоров

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

Рассмотрена возможность определения энергии кумулятивной струи двумя способами: по энергии деформирования цилиндрического образца из пластичной стали и по необратимым потерям энергии при проникании кумулятивной струи в него. Приведены теоретические зависимости для оценки кинетической энергии кумулятивной струи по этим двум способам. На их основе разработаны экспериментальные методики, по которым проведены измерения кинетической энергии кумулятивной струи для различных типов лабораторных кумулятивных зарядов.

Ключевые слова: кумулятивный заряд, кумулятивная струя, кинетическая энергия, внутренняя энергия, калориметрия, пробоина

Введение. В настоящее время кумулятивный эффект взрыва используется в военных целях и для решения некоторых народнохозяйственных задач [1–3]. Основное преимущество кумулятивных зарядов заключается в значительном пробивном действии, которое может достигать 6...8 диаметров заряда и более при действии по стальным преградам [1, 4]. При этом пробивным действием можно управлять, например, с помощью изменения направления фронта детонационной волны в заряде взрывчатого вещества (ВВ), электромагнитного или теплового воздействия на кумулятивную облицовку или кумулятивную струю [4–12].

Пробивное действие кумулятивных зарядов обеспечивается высокой кинетической энергией кумулятивной струи, образуемой из металлической облицовки кумулятивной выемки заряда ВВ. Энергия кумулятивной струи — один из важнейших параметров, определяющих эффективность действия кумулятивных зарядов: чем больше кинетическая энергия кумулятивной струи, тем больше глубина и объем образуемой в преграде каверны (пробоины) [4]. Кроме того, в большинстве случаев оказывается, что энергия струи является единственным параметром, определяющим запреградный эффект кумулятивных зарядов, так как воздействие на преграду ударной волны и продуктов детонации непосредственно от взрыва заряда ВВ практически очень мало [1, 4].

Общая энергия кумулятивной струи после окончательного ее формирования и достижения эффективной длины (с учетом макси-

мального коэффициента удлинения) состоит из суммы кинетической энергии отдельных элементов и суммы изменения их внутренней энергии:

$$E_c = \sum_{i=1}^{i=n} \frac{M_{c_i} v_{c_i}^2}{2} + \sum_{i=1}^{i=n} \Delta U_i, \quad (1)$$

где i — порядковый номер элемента струи; n — общее количество элементов струи; M_{c_i} — масса i -го элемента струи; v_{c_i} — скорость i -го элемента струи; ΔU_i — изменение внутренней энергии элемента струи.

Изменение внутренней энергии ΔU_i следует определять по агрегатному состоянию элементов струи после окончательного формирования и можно выразить через одну из следующих зависимостей:

$$\begin{cases} \Delta U_i = c M_{c_i} \Delta T_i, \\ \Delta U_i = \lambda M_{c_i}, \\ \Delta U_i = g M_{c_i}, \end{cases} \quad (2)$$

где c , λ , g — соответственно удельная теплоемкость, удельная теплота плавления и удельная теплота сгорания материала i -го элемента струи; ΔT_i — изменение абсолютной температуры i -го элемента струи.

В случае когда элементы кумулятивной струи находятся в различных агрегатных состояниях, изменение внутренней энергии можно определить по формулам (2). Для кумулятивной струи из традиционных материалов, таких как медь и сталь, основную долю энергии составляет ее кинетическая энергия. По оценкам, сделанным для наиболее энергоемкого материала — алюминия, доля внутренней энергии от общей энергии кумулятивной струи составляет примерно 4 %, а если считать, что элемент струи находится в расплавленном состоянии, то доля внутренней энергии увеличивается до 6 %. Поэтому в последующих оценках и расчетах будем полагать, что энергию кумулятивной струи можно определить только по кинетической энергии ее элементов:

$$E_c \approx \sum_{i=1}^{i=n} \frac{M_{c_i} v_{c_i}^2}{2}. \quad (3)$$

Определить энергию кумулятивной струи непосредственно через массу элементов струи и их скорость сложно, тем не менее задачу можно решить путем рентгенографирования кумулятивной струи в процессе ее образования и растяжения. Однако для постановки таких экспериментов необходима специальная аппаратура (рентгенографическая установка) и требуются особые условия для их проведения.

Такая аппаратура есть и используется некоторыми промышленными и академическими организациями, которые занимаются исследованиями быстропротекающих процессов. Разработаны соответствующие методики, в частности широко известный метод «меченой струи», предложенный в 1956 г. академиком В.М. Титовым [4, 13]. В настоящее время подобные методики совершенствуются, однако их использование, например, при проведении учебных лабораторных работ в вузах, неоправданно и затруднено в силу объективных причин. К тому же если точность определения скорости элемента струи при рентгенографировании достаточно велика, точность определения массы элемента струи при обработке рентгенограмм составляет лишь 20...30 % [14].

В настоящей статье рассматривается вопрос о возможности экспериментально-теоретического определения энергии кумулятивной струи двумя достаточно простыми способами:

- по энергии деформирования цилиндрического образца из пластичной стали;
- по необратимым потерям энергии при проникании кумулятивной струи в цилиндрический образец из пластичной стали, определяемым методом калориметрирования.

Оба способа разработаны и апробированы в МГТУ им. Н.Э. Баумана при проведении исследовательских и учебных лабораторных работ [14].

Определение энергии кумулятивной струи по энергии деформирования цилиндрического образца из пластичной стали. Теоретическая часть. При проникании в преграду кинетическая энергия кумулятивной струи расходуется на механическую работу по углублению и радиальному расширению пробоины. Образование полости в металлической преграде, вызванное воздействием элементов струи, происходит за счет расходования материала самих элементов струи при проникании [4].

Воспользуемся предположением о том, что кинетическая энергия кумулятивной струи при внедрении в пластическую преграду полностью переходит в работу радиального расширения пробоины, и примем следующие допущения:

- энергия кумулятивной струи выделяется вдоль оси пробоины мгновенно;
- образец (преграда) представляет собой цилиндр из идеального пластического материала, динамический предел текучести которого при растяжении и сжатии одинаков и постоянен;
- радиальное расширение пробоины происходит вследствие деформирования материала по сечениям в направлении, перпендикулярном оси пробоины, а деформирование в осевом направлении не происходит.

Задача по расчету работы радиального расширения пробоины в стальной преграде при проникании кумулятивной струи сводится к определению работы пластического деформирования материала.

Для получения расчетных формул введем следующие обозначения:

$r_1 = 0$ — начальный внутренний радиус цилиндра;

r_2 — начальный наружный радиус цилиндра;

R_1 — внутренний радиус деформированного цилиндра;

R_2 — наружный радиус деформированного цилиндра;

r — текущий радиус цилиндра до деформирования;

R — текущий радиус цилиндра после деформирования;

$\epsilon_r, \epsilon_h, \epsilon_\varphi$ — деформации соответственно в радиальном, осевом и

окружном направлениях;

ϵ_i — интенсивность деформаций;

H, h_i — высота цилиндра и цилиндрического i -го слоя;

$A_{уд}$ — удельная работа деформирования материала в данной точке;

E — полная энергия деформирования цилиндра.

Известно, что удельная работа деформирования материала в данной точке

$$A_{уд} = \int_0^{\epsilon_i} \sigma_i \epsilon_i d\epsilon_i, \quad (4)$$

где σ_i — интенсивность напряжений.

Тогда полная энергия деформирования цилиндра по всему объему V составит

$$E = \int_V \left[\int_0^{\epsilon_i} \sigma_i \epsilon_i d\epsilon_i \right] dV. \quad (5)$$

Интенсивность деформаций определяется по формуле

$$\epsilon_i = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\epsilon_r - \epsilon_\varphi)^2 + (\epsilon_\varphi - \epsilon_h)^2 + (\epsilon_h - \epsilon_r)^2}. \quad (6)$$

Из условия несжимаемости среды $\epsilon_r + \epsilon_h + \epsilon_\varphi = 0$ с учетом принятых допущений получаем выражение $\epsilon_\varphi - \epsilon_r = \ln \frac{R}{r}$. Подставляя его в уравнение (6), получаем

$$\varepsilon_i = \frac{2}{\sqrt{3}} \varepsilon_\varphi = \frac{2}{\sqrt{3}} \ln \frac{R}{r}, \quad (7)$$

где R, r — радиусы деформированного и недеформированного цилиндрического образца соответственно.

Деформация стального цилиндра (рис. 1) отвечает уровню $rdr = R dR$, откуда с учетом принятых обозначений получаем соотношение

$$r = \sqrt{R^2 + r_1^2 - R_1^2}. \quad (8)$$

Подставив в выражение (5) соотношения (7), (8) и учитывая, что $\sigma_i = \sigma_{т.д}$, где $\sigma_{т.д}$ — динамический предел текучести, получаем

$$E = \frac{4\pi}{\sqrt{3}} H \sigma_{т.д} \int_{R_1}^{R_2} R \ln \frac{R}{\sqrt{R^2 + r_1^2 - R_1^2}} dR. \quad (9)$$

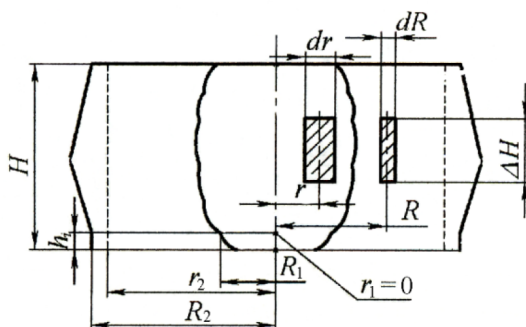


Рис. 1. Схема деформирования стального цилиндра и радиального расширения пробоины при проникании кумулятивной струи

Уравнение (9) представим в виде

$$E = \frac{4\pi}{\sqrt{3}} H \sigma_{т.д} J, \quad (10)$$

где

$$J = \int_{R_1}^{R_2} R \ln \frac{R}{\sqrt{R^2 + r_1^2 - R_1^2}} dR. \quad (11)$$

Выражение (11) можно проинтегрировать при условии, что начальный радиус отверстия равен нулю ($r_1 = 0$), тогда получаем соотношение

$$J = \frac{1}{4} \left\{ \left(\frac{R_2}{R_1} \right)^2 \ln \left(\frac{R_2}{R_1} \right)^2 - \left[\left(\frac{R_2}{R_1} \right)^2 - 1 \right] \ln \left[\left(\frac{R_2}{R_1} \right)^2 - 1 \right] \right\}. \quad (12)$$

Для дальнейших расчетов значение интеграла (12) представим графически в виде функции $J = J\left(\frac{R_2}{R_1}\right)$ (рис. 2).

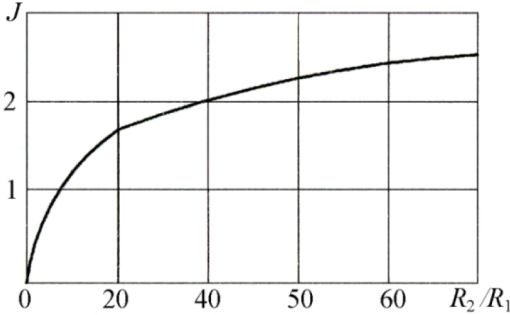


Рис. 2. Графическое представление интеграла J в виде функциональной зависимости $J = J\left(\frac{R_2}{R_1}\right)$

В целях упрощения расчетов реальный криволинейный профиль пробоины можно заменить ступенчатым и для каждой ступени h_i определить средний внутренний радиус пробоины R_{1i} и средний наружный радиус пробоины R_{2i} деформированного цилиндра в рассматриваемом сечении (см. рис. 1). Поэтому формулу для расчета энергии кумулятивной струи, которая выделяется в i -м сечении цилиндрического образца, можно записать в виде

$$E_{c_i} = Kh_i R_{1i} J \cdot 10^{-1}, \quad (13)$$

где E_{c_i} — в джоулях; $K = 49,25$; h_i и R_{1i} — в миллиметрах.

Полную энергию кумулятивной струи можно определить по равенству

$$E_c = \sum_{i=1}^{i=n} E_{c_i}.$$

Экспериментальная часть. Предварительно были проведены исследования по выбору материала и диаметра цилиндрического образца, использовались лабораторные кумулятивные заряды из флегматизированного гексогена различных типов (табл. 1).

Таблица 1

Характеристики используемых кумулятивных зарядов

Тип заряда	Диаметр заряда d_3 , мм	Высота заряда h_3 , мм	Угол конуса кумулятивной оболочки 2α , град	Толщина кумулятивной оболочки δ_0 , мм	Материал кумулятивной оболочки	Масса кумулятивной оболочки M_0 , г
1	46	61,4	60	1,7	Медь	41,0
2	25	50,0	30	1,0	Медь	10,0
					Сталь	8,8
					Алюминий	3,0
3	25	40,0	44	1,0	Медь	6,3
					Сталь	5,5
					Алюминий	1,9
				2,0	Медь	13,9
					Сталь	11,8
					Алюминий	4,2
4	25	34,8	60	1,0	Медь	4,4
					Сталь	3,8
					Алюминий	1,3
				2,0	Медь	9,7
					Сталь	8,5
					Алюминий	2,9
5	70	86,0	65	2,0	Медь	129,0
				2,0	Сталь	113,0
				4,0	Алюминий	51,6

Заряды отстреливали по цилиндрическим образцам различных диаметров (от 15 до 70 мм) и материалов (Ст3, Ст45, сталь У8). После отстрелов цилиндрические образцы разрезали вдоль оси образующей пробойны и проводили металлографические исследования в различных сечениях по глубине пробойны и в радиальном направлении. Было установлено, что зона пластических деформаций равна примерно двум диаметрам отверстия в пробитом цилиндре для данного сечения. Из трех вышеуказанных материалов наименьшее количество трещин в зоне проникания наблюдается для Ст3, поэтому данный материал был выбран в качестве основного для дальнейших исследований. Динамический предел текучести для этого материала в рассматриваемых условиях был принят равным $\sigma_{т.д} = 8,24 \cdot 10^8$ Па [15].

Для удобства замера радиусов деформирования цилиндрического образца в различных сечениях по длине пробойны вдоль образующей

цилиндра с шагом h_i просверливали отверстия глубиной несколько большей, чем радиус цилиндра, что позволяло после разрезания образца фиксировать риски для дальнейшего измерения. С помощью металлической линейки и штангенциркуля можно провести измерения параметров R_1 и R_2 (см. рис. 1) для каждого сечения на разрезанном образце и по графику (см. рис. 2) определить соответствующие значения интеграла J для подстановки в формулу (13). Общий вид разрезанного образца после проведения опыта представлен на рис. 3.



Рис. 3. Общий вид разрезанного вдоль оси цилиндрического образца после проведения эксперимента

С помощью лабораторного баллистического маятника были проведены также оценки значения кинетической энергии кумулятивной струи, которая расходуется на работу осевого деформирования преграды. Угол β отклонения груза баллистического маятника от вертикального положения оказался соответственно равным: для варианта заряда 1 — $\beta = 12^\circ$; зарядов вариантов 2–4 с медными облицовками — $\beta = 2 \dots 4^\circ$, со стальными облицовками — $\beta = 3 \dots 6^\circ$ и алюминиевыми облицовками — $\beta = 6 \dots 9^\circ$ (см. табл. 1). Воспользовавшись зависимостью работы по подъему груза от угла отклонения β , определили значение энергии для всех исследованных типов кумулятивных зарядов, которое не превышает ≈ 25 Дж, и в дальнейших расчетах им можно пренебречь.

Результаты измерений кинетической энергии кумулятивной струи первым способом для заряда варианта 5 (см. табл. 1) представлены на рис. 4, откуда видно, что для алюминиевой облицовки энергия кумулятивной струи на начальных участках проникания больше, чем для стальных и медных, следовательно, для преград относительно небольшой толщины обеспечивается больший запреградный эффект, хотя общая энергия струи меньше, чем для кумулятивных зарядов со стальной и медной облицовками.

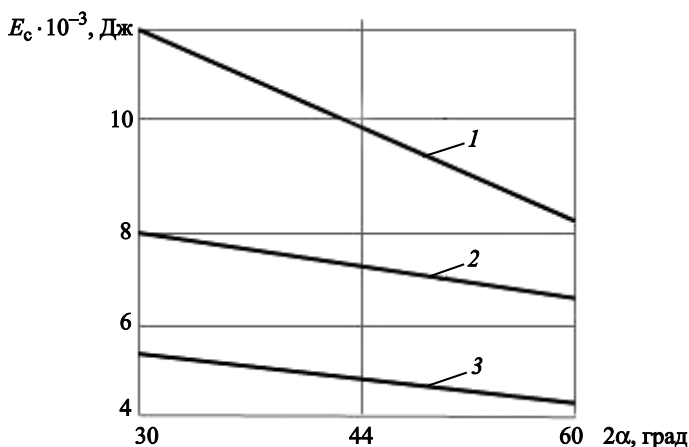


Рис. 4. Изменение кинетической энергии вдоль пробоины для кумулятивных зарядов диаметров $d_3 = 70$ мм с облицовками из разных материалов (см. табл. 1, тип 5):

1 — алюминий; 2 — медь; 3 — сталь

Изменение энергии кумулятивной струи для вариантов зарядов 2–4 (см. табл. 1) с медной, стальной и алюминиевой облицовками в зависимости от угла 2α раствора конической кумулятивной облицовки показано на рис. 5. Наибольшую по абсолютному значению энергию имеет струя зарядов с медной облицовкой, наименьшую — с алюминиевой.

Определение энергии кумулятивной струи методом калориметрирования. Установлено, что работа кинетического деформирования мягкой стали без нарушения ее сплошности (появления трещин и разрывов) практически полностью (90...92 %) переходит в тепловую энергию деформируемого материала. Остальная часть энергии аккумулируется в деформированной преграде в виде потенциальной энергии. Оценим вклад в увеличение тепловой энергии в зависимости от внутренней энергии элементов кумулятивной струи с учетом следующих предположений:

- металлическая струя (медная, стальная или алюминиевая) находится в твердом состоянии;

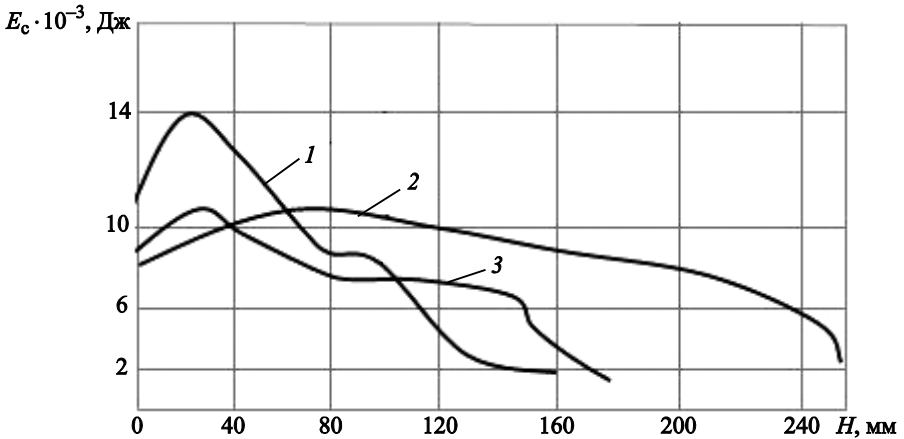


Рис. 5. Изменение кинетической энергии для кумулятивных зарядов типов 2–4 (см. табл. 1) в зависимости от угла раствора конической кумулятивной облицовки из разных материалов:

1 — медь; 2 — сталь; 3 — алюминий

- фокусное расстояние выбрано так, что струя еще не разрывается на отдельные элементы;
- при малых фокусных расстояниях пренебрегаем увеличением внутренней энергии струи от нагрева при торможении и окислении;
- температуру струи считаем равной 400...900 °С [4].

Для приближенной оценки температуры кумулятивной струи определяем температуру песта (оставшаяся несработавшая массивная и низкоскоростная часть струи, которая либо застревает в преграде, либо «ловится» за преградой в мягкую среду, например опилки) [4]. При этом необходимо как можно быстрее поместить горячий пест в калориметр, обеспечив минимальные потери от его остывания в воздухе. Известно, что количество теплоты Q , полученное телом массой M при увеличении его температуры на ΔT , составляет [16]

$$Q = cM\Delta T, \quad (14)$$

где c — удельная теплоемкость материала тела.

Для дальнейших расчетов принимаем [16]:

$$c_{Al} = 0,88 \cdot 10^3 \text{ Дж/кг} \cdot \text{град в диапазоне } 300 \dots 600 \text{ }^\circ\text{C};$$

$$c_{Fe} = 0,46 \cdot 10^3 \text{ Дж/кг} \cdot \text{град в диапазоне } 300 \dots 1000 \text{ }^\circ\text{C};$$

$$c_{Cu} = 0,39 \cdot 10^3 \text{ Дж/кг} \cdot \text{град в диапазоне } 300 \dots 1000 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Полагая в первом приближении температуру струи равной температуре песта, находим изменение ее внутренней энергии, поглощенной цилиндрическим образцом в процессе проникания:

$$\Delta U = (M_o - M_n) c (T_n - T_o), \quad (15)$$

где M_o — масса кумулятивной облицовки; M_n — масса песта; c — удельная теплоемкость материала облицовки; T_n — температура песта; T_o — начальная температура облицовки.

Во всех дальнейших расчетах учитывается эта поправка на изменение внутренней энергии ΔU .

В предлагаемой методике по определению полной энергии кумулятивной струи для лабораторных модельных зарядов массой ВВ до 120 г полагаем, что полная энергия струи определяется по формуле (1).

Экспериментально эту энергию определяем с помощью калориметрической установки (калориметр марки КЛ-1). Оценка доли кинетической энергии, расходуемой на генерирование ударной волны и на деформации в осевом направлении, проводилась на баллистическом маятнике (см. выше).

Деформированный и нагретый после пробития кумулятивной струей цилиндрический образец помещают в калориметрический сосуд. Погрешностью, вносимой изменением температуры образца при переносе его в калориметр, можно пренебречь. Измеряя температуру в калориметре перед проведением эксперимента, когда в сосуде находится определенное количество воды и цилиндрический образец, и после эксперимента, когда в калориметре наступает тепловое равновесие (температура за 1...3 мин, по показаниям метастатического термометра, не изменяется), определяем по их разности изменение температуры в калориметре. При этом теплообменом с деталями калориметра можно пренебречь, так как температурная поправка составляет 0,5 %.

Определив изменение температуры в калориметре (ΔT), можно найти в соответствии с формулой (14) количество теплоты, выделившееся в цилиндрическом образце:

$$Q = (M_{\text{в}} c_{\text{в}} + M_{\text{ц}} c_{\text{ц}}) \Delta T, \quad (16)$$

где Q — количество теплоты, Дж; $M_{\text{в}}$ — масса воды в калориметре, кг; $M_{\text{ц}}$ — масса цилиндрического образца, кг; $c_{\text{в}}$ — удельная теплоемкость воды, Дж/кг · град; $c_{\text{ц}}$ — удельная теплоемкость материала цилиндрического образца, Дж/кг · град; ΔT — изменение температуры, °С.

При этом для воды принимается значение $c_{\text{в}} = 4,19 \cdot 10^3$ Дж/кг · град. Полученное количество теплоты Q будет приближенно определять кинетическую энергию струи E_c , затраченную на нагрев образца (табл. 2, 3).

Таблица 2

Кинетическая энергия (Дж) кумулятивной струи

Тип заряда	Материал кумулятивной облицовки	Ф*	К*	Р**
1	Медь	54 000	59 800	59 500
5	Медь	230 000	231 000	—
	Сталь	150 000	151 200	—
	Алюминий	130 000	132 000	—

*Для зарядов вариантов 1 и 5 (см. табл. 1) значения E_c определены по энергии формоизменения цилиндрического образца (первый способ Ф) и калориметрическим способом (К).
 **Для сравнения приведено значение энергии, полученное М.А. Дубовским на основе рентгенографических исследований.

Таблица 3

Кинетическая энергия (Дж) кумулятивной струи в зависимости от материала облицовки (толщина облицовки $\delta_0 = 1$ мм)

Тип заряда*	Материал кумулятивной облицовки	Способ исследования*	
		Ф	К
2	Медь	11 240	12 000
	Сталь	7700	8200
	Алюминий	4990	5400
3	Медь	9510	9850
	Сталь	7580	8000
	Алюминий	4640	5000
4	Медь	8480	8600
	Сталь	6320	6600
	Алюминий	4260	4500

*См. тип заряда — табл. 1, способы — табл. 2.

Значения E_c , замеренные разными методами, отличаются одно от другого с погрешностью 12 %.

Заключение. Определение энергии кумулятивной струи по энергии формоизменения преграды и калориметрическим методом можно использовать не только в лабораторных условиях для кумулятивных зарядов небольших масс ВВ, но и в полигонных условиях для зарядов больших диаметров.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Бабкин А.В., Велданов В.А., Грязнов Е.Ф., Имховик Н.А., Кобылкин И.Ф., Колпаков В.И., Ладов С.В., Орленко Л.П., Охитин В.Н., Ришняк А.Г., Селиванов В.В. *Боеприпасы*. В 2 т. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016, т. 1, 506 с.
- [2] Одинцов В.А., Ладов С.В., Левин Д.П. *Оружие и системы вооружения*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016, 219 с.
- [3] Селиванов В.В., Кобылкин И.Ф., Новиков С.А. *Взрывные технологии*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014, 519 с.

- [4] Андреев С.Г., Бабкин А.В., Баум Ф.А., Имховик Н.А., Кобылкин И.Ф., Колпаков В.И., Ладов С.В., Одинцов В.А., Орленко Л.П., Охитин В.Н., Селиванов В.В., Соловьев В.С., Станкович К.П., Чельшев В.П., Шехтер Б.И. *Физика взрыва*. В 2 т. Изд. 3-е, испр. Москва, Физматлит, 2002, т. 2, 656 с.
- [5] Федоров С.В., Бабкин А.В., Ладов С.В. Проявление магнитокумулятивного эффекта при взрыве кумулятивного заряда с созданным в его облицовке аксиальным магнитным полем. *Журнал технической физики*, 2003, т. 73, № 8, с. 111–117.
- [6] Федоров С.В., Бабкин А.В., Ладов С.В. Особенности инерционного удлинения высокоградиентного проводящего стержня в продольном низкочастотном магнитном поле. *Инженерно-физический журнал*, 2001, т. 74, № 2, с. 79–86.
- [7] Федоров С.В., Бабкин А.В., Ладов С.В. О влиянии магнитного поля, создаваемого в облицовке кумулятивного заряда, на его пробивное действие. *Физика горения и взрыва*, 1999, т. 35, № 5, с. 145–146.
- [8] Федоров С.В., Бабкин А.В., Ладов С.В. Развитие магнитогиродинамической неустойчивости не подвергающейся электродинамическому воздействию кумулятивной струи. *Оборонная техника*, 1998, № 1–2, с. 49–56.
- [9] Федоров С.В., Бабкин А.В., Ладов С.В., Швецов А.Г., Матросов А.Д. Прогнозирование пробивной способности металлических кумулятивных струй при пропускании по ним мощного импульса электрического тока. *Журнал технической физики*, 2003, т. 73, № 7, с. 28–36.
- [10] Федоров С.В., Бабкин А.В., Ладов С.В., Швецов Г.А., Матросов А.Д., Анисимов А.Г. Влияние магнитного поля в облицовке кумулятивного заряда и в проводящей преграде на формирование и проникание кумулятивных струй. *Оборонная техника*, 2004, № 1–2, с. 55–56.
- [11] Бабкин А.В., Колпаков В.И., Ладов С.В., Плетнев С.Л., Федоров С.В., Бондаренко П.А. О возможностях «теплового» способа повышения пробития кумулятивных зарядов. *Оборонная техника*, 2000, № 1–2, с. 41–48.
- [12] Бабкин А.В., Бондаренко П.А., Федоров С.В., Ладов С.В., Колпаков В.И., Андреев С.Г. Пределы увеличения глубины пробития кумулятивного заряда при импульсном тепловом воздействии на его облицовку. *Физика горения и взрыва*, 2001, т. 37, № 6, с. 124–132.
- [13] Григорян В.А., Белобородько А.Н., Дорохов Н.С., Кобылкин И.Ф., Коновалов А.В., Маринин В.М., Соколов И.В. *Частные вопросы конечной баллистики*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006, 592 с.
- [14] Бабкин А.В., Гелин Д.В., Ладов С.В., Марков В.А., Орленко Л.П., Федоров С.В. *Физика взрыва и удара*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010, 75 с.
- [15] Орленко Л.П. *Поведение материалов при интенсивных динамических нагрузках*. Москва, Машиностроение, 1964, 168 с.
- [16] Кошкин Н.И., Ширкевич М.Г. *Справочник по элементарной физике*. Изд. 3-е, перераб. и доп. Москва, Наука, 1965, 246 с.

Статья поступила в редакцию 02.02.2017

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Васюков В.И., Дильдин Ю.М., Ладов С.В., Федоров С.В. Определение энергии кумулятивной струи различными способами. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2017, вып. 4. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2017-4-1608>

Васюков Владимир Иванович — канд. техн. наук, доцент кафедры «Физика» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 100 научных работ в области физики взрыва.

Дильдин Юрий Михайлович — канд. техн. наук, ст. науч. сотр. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 80 научных работ в области физики взрыва.

Ладов Сергей Вячеславович — канд. техн. наук, чл.-корр. РАЕН, доцент кафедры «Высокоточные летательные аппараты» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 350 научных работ в области физики взрыва. e-mail: sm4-2009@mail.ru

Федоров Сергей Владимирович — ст. преподаватель кафедры «Высокоточные летательные аппараты» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 300 научных работ в области физики взрыва и высокоскоростного удара. e-mail: sergfed-64@mail.ru

Estimating the energy of a shaped charge jet using various methods

© V.I. Vasyukov, Yu.M. Dildin, S.V. Ladov, S.V. Fedorov

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

The study considers the possibility of estimating shaped charge jet energy through two methods: one based on deformation energy in a cylindrical target made of mild steel and the other based on irreversible energy loss over the course of the shaped charge jet penetrating the same target. We supply analytical equations for estimating kinetic energy of a shaped charge jet according to the two methods outlined above. We developed experimental procedures based on the two methods suggested, and used these procedures to measure the shaped charge jet kinetic energy for various types of laboratory shaped charges.

Keywords: *shaped charge, shaped charge jet, kinetic energy, internal energy, calorimetry, hole*

REFERENCES

- [1] Babkin A.V., Veldanov V.A., Gryaznov E.F., Imkhovik N.A., Kobylkin I.F., Kolpakov V.I., Ladov S.V., Orlenko L.P., Okhitin V.N., Rishnyak A.G., Selivanov V.V. *Boepripasy. V 2 tomakh. Tom 1* [Munitions. In 2 vols. Vol. 1]. Moscow, BMSTU Publ., 2016, 506 p.
- [2] Odintsov V.A., Ladov S.V., Levin D.P. *Oruzhie i sistemy vooruzheniya* [Armament and weapons systems]. Moscow, BMSTU Publ., 2016, 219 p.
- [3] Selivanov V.V., Kobylkin I.F., Novikov S.A. *Vzryvnye tekhnologii* [Explosive technologies]. Moscow, BMSTU Publ., 2014, 519 p.
- [4] Andreev S.G., Babkin A.V., Baum F.A., Imkhovik N.A., Kobylkin I.F., Kolpakov V.I., Ladov S.V., Odintsov V.A., Orlenko L.P., Okhitin V.N., Selivanov V.V., Solovev V.S., Stanyukovich K.P., Chelyshev V.P., Shekhter B.I. *Fizika vzryva. V 2 tomakh. Tom 2* [Physics of Explosion. In 2 vols. Vol. 2]. 3rd edition. Moscow, FIZMATLIT Publ., 2002, 656 p.
- [5] Fedorov S.V., Babkin A.V., Ladov S.V. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki — Technical Physics*, 2003, vol. 73, no. 8, pp. 111–117.
- [6] Fedorov S.V., Babkin A.V., Ladov S.V. *Inzhenerno-fizicheskiy zhurnal — Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2001, vol. 74, no. 2, pp. 79–86.
- [7] Fedorov S.V., Babkin A.V., Ladov S.V. *Fizika goreniya i vzryva — Physics of Combustion and Explosion*, 1999, vol. 35, no. 5, pp. 145–46.
- [8] Fedorov S.V., Babkin A.V., Ladov S.V. *Oboronnaya tekhnika — Defence technology*, 1998, no. 1–2, pp. 49–56.
- [9] Fedorov S.V., Babkin A.V., Ladov S.V., Shvetsov A.G., Matrosov A.D. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki — Technical Physics*, 2003, vol. 73, no. 7, pp. 28–36.
- [10] Fedorov S.V., Babkin A.V., Ladov S.V., Shvetsov G.A., Matrosov A.D., Anisimov A.G. *Oboronnaya tekhnika — Defence technology*, 2004, no. 1–2, pp. 55–56.
- [11] Babkin A.V., Kolpakov V.I., Ladov S.V., Pletnev S.L., Fedorov S.V., Bondarenko P.A. *Oboronnaya tekhnika — Defence technology*, 2000, no. 1–2, pp. 41–48.
- [12] Babkin A.V., Bondarenko P.A., Fedorov S.V., Ladov S.V., Kolpakov V.I., Andreev S.G. *Fizika goreniya i vzryva — Physics of Combustion and Explosion*, 2001, vol. 37, no. 6, pp. 124–132.

- [13] Grigoryan V.A., Beloborodko A.N., Dorokhov N.S., Kobylkin I.F., Kononov A.V., Marinin V.M., Sokolov I.V. *Chastnye voprosy konechnoy ballistiki* [Specific issues of terminal ballistics]. Moscow, BMSTU Publ., 2006, 592 p.
- [14] Babkin A.V., Gelin D.V., Ladov S.V., Markov V.A., Orlenko L.P., Fedorov S.V. *Fizika vzryva i udara* [Physics of explosion and impact]. Moscow, BMSTU Publ., 2010, 75 p.
- [15] Orlenko L.P. *Povedenie materialov pri intensivnykh dinamicheskikh nagruzkakh* [Material behaviour under intensive dynamic loads]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1964, 168 p.
- [16] Koshkin N.I., Shirkevich M.G. *Spravochnik po elementarnoy fizike* [Elementary physics handbook]. 3rd edition. Moscow, Nauka Publ., 1965, 246 p.

Vasyukov V.I. graduated from Bauman Moscow Higher Technical School in 1965. Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor. Author of over 100 scientific publications in the field of physics of explosion.

Dildin Yu.M. graduated from Bauman Moscow Higher Technical School in 1969. Cand. Sc. (Eng.), Senior Research Scientist. Author of over 80 scientific publications in the field of physics of explosion.

Ladov S.V. graduated from Bauman Moscow Higher Technical School in 1972. Cand. Sc. (Eng.), Corresponding Member of the Russian Academy of Natural Sciences, Assoc. Professor, Department of High-Precision Airborne Devices, Bauman Moscow State Technical University. Author of over 350 scientific publications in the field of physics of explosion. e-mail: sm4-2009@mail.ru

Fedorov S.V. graduated from Bauman Moscow Higher Technical School in 1987 and Lomonosov Moscow State University in 1992. Senior Lecturer, Department of High-Precision Airborne Devices, Bauman Moscow State Technical University. Author of over 300 scientific publications in the field of physics of explosion and high-speed impact. e-mail: sergfed-64@mail.ru