

## ДЕТОНАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И МЕТАТЕЛЬНО-ДРОБЯЩЕЕ ДЕЙСТВИЕ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ ВЗРЫВЧАТЫХ СОСТАВОВ

В.Н. Куликов<sup>1</sup>, А.Н. Осавчук<sup>1</sup>, Н.А. Имховик<sup>2</sup>, В.А. Одинцов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ФЦДТ “Союз”, г. Дзержинский Московской обл., Россия

<sup>2</sup>МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

e-mail: imkhovik-n@mail.ru

*Изучены детонационные свойства, метательное и осколочно-дробящее действия новых мощных взрывчатых составов, разрабатываемых на основе компонентов и технологии отечественных высокоэнергетических твердых ракетных топлив. Приведены результаты исследований, проведенных в ФЦДТ “Союз”, и численного термодинамического моделирования, выполненного по методике МГТУ им. Н.Э. Баумана. Проанализированы результаты статистической обработки осколочных спектров стандартных осколочных цилиндров (RSFC) № 12, снаряженных новыми многокомпонентными ВВ — ТРТ, и рассмотрена возможность представления полученных спектров с помощью новой гиперэкспоненциальной модели распределения — модели Одинцова–Грэди.*

**Ключевые слова:** многокомпонентные взрывчатые составы, твердые ракетные топлива, детонационные параметры, метательная способность, осколочно-дробящее действие, стандартный осколочный цилиндр.

## DETONATION CHARACTERISTICS, PROPELLING AND FRAGMENTING PERFORMANCE OF THE MULTICOMPONENT EXPLOSIVE COMPOSITIONS

V.N. Kulikov<sup>1</sup>, A.N. Osavchuk<sup>1</sup>, N.A. Imkhovik<sup>2</sup>, V.A. Odintsov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>FCDT “Soys”, Dzerzhinsky, Moscow region, Russia

<sup>2</sup>Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

e-mail: imkhovik-n@mail.ru

*The detonation properties, propelling and fragmenting-splintering action of new powerful explosive compositions that are developed on the basis of components and technologies, applied in manufacturing of domestic high-energy solid propellants, are investigated. The results of the complex experimental studies, conducted in the Federal Center for Dual-Use Technologies “Soyuz” as well as the results of numerical thermodynamic modeling, performed using the Bauman MSTU method are presented. The results of statistical processing of fragmentation spectra of the Russian standard fragmenting cylinders (RSFC) no. 12, filled with new multi-component explosive compositions (solid rocket fuels) are analyzed. The possibility to represent the obtained spectra using the new hyperexponential distribution model — the Odintsov–Grady model is considered.*

**Keywords:** multi-explosive compounds, solid rocket fuels, detonation parameters, propelling ability, fragmenting-splintering performance, standard fragmenting cylinder.

Исследования по разработке новых многокомпонентных взрывчатых составов (ВС) на основе мощного бризантного ВВ, окислителя, металлического горючего и полимерного связующего (типовых компонентов высокоэнергетических твердых ракетных топлив (ТРТ)) в

целях применения данных ВС (по сути модифицированных детонационноспособных ТРТ) в качестве разрывных зарядов для боеприпасов различного назначения за рубежом проводятся уже многие десятилетия [1, 2]. Однако особенно активными (и продуктивными) данные исследования и разработки стали в последний период. Вместе с тем в отечественной практике этому направлению исследований до последнего времени уделялось явно недостаточное внимание. Предварительный анализ состояния проблемы создания ВС повышенной эффективности и эксплуатационной безопасности на основе компонентов и технологии отечественных высокоэнергетических ТРТ и результаты экспериментально-теоретических исследований [3–6] показали перспективность данного направления разработок, в том числе и для создания боеприпасов повышенной стойкости к опасным внешним воздействиям, называемых за рубежом “боеприпасами пониженного риска”. Кроме того, детонационно-способные баллиститные и смесевые ТРТ, имеющие не только высокий удельный импульс (2300...2600 м/с), но и приемлемые характеристики дробления оболочек (патенты РФ № 2326335 и 2363915), могут быть востребованы и для ряда перспективных конструкций осколочных (О), осколочно-кинетических (ОК) и осколочно-фугасных (ОФ) боеприпасов (БП) с адаптивными зарядами двойного назначения: ВВ – ТРТ (патенты РФ № 2082943, 2095739, 2282821 и др.).

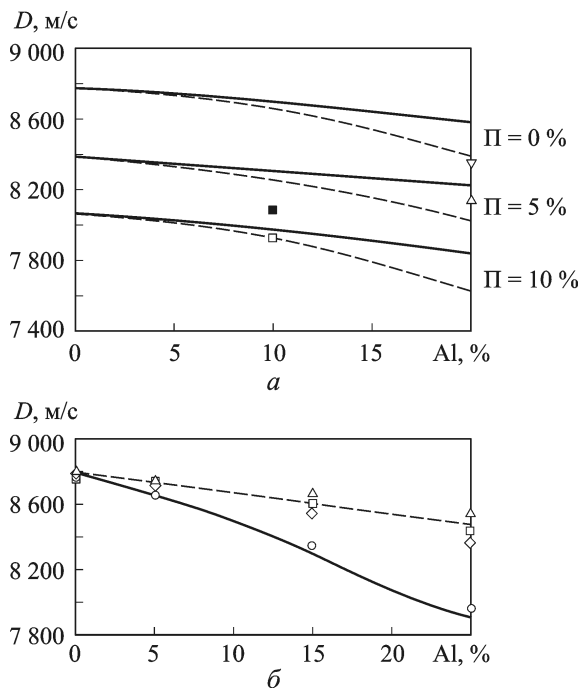
Высокоэнергетические смесевые ТРТ, содержащие металлическое горючее (дисперсный алюминий) и неорганический окислитель (ПХА), кроме того, как известно, обладают еще и повышенным фугасным действием [1, 2]. Вместе с тем также известно (см., например [2, 7]), что одновременное введение добавок Al и неорганических окислителей в состав мощных бризантных ВВ и ВС на основе гексогена, октогена, CL-20 и других снижает скорость и давление детонации данных ВС, оказывая при этом сложное многоплановое влияние на их метательную способность, и, как правило, снижает бризантно-дробящее действие взрыва (что не приемлемо для О и ОФ БП с корпусами естественного дробления).

В связи с этим общая задача исследований состояла в комплексном изучении взрывчатых, технологических и эксплуатационных характеристик модельных ВС на основе ТРТ (заряды в виде шашек и масс без отвердителя) и определении диапазона соотношений компонент (в первую очередь, Al и октогена) и плотностей (пористости) зарядов, обеспечивающих требуемые детонационные и энергетические характеристики в сочетании с приемлемым для О и ОФ БП метательным и осколочно-дробящим действием (на уровне, не ниже мощных штатных составов).

В настоящей работе, являющейся частью комплексных исследований, в продолжение работ [3–6] приводятся результаты экспериментального изучения, проведенного в ФЦДТ “Союз”, и численного термодинамического моделирования (по методикам МГТУ им. Н.Э. Баумана [7–9]) для семи предварительно отобранных модельных ВС — ТРТ, отличающихся различным содержанием Al — 0%, 10%, 20% (индексы ВСА-0, ВСА-10 и ВСА-20, соответственно), и различным содержанием октогена — 36, 60, 75 и 79% (индексы ВСО-36, ВСО-60, ВСО-75 и ВСО-79, соответственно). Изменение содержания Al в составах типа ВСА осуществлялось за счет октогена (содержание связующего и окислителя были постоянными), а изменение содержания октогена в последних четырех составах — за счет Al и окислителя (содержание активного связующего было постоянным  $\approx 17\%$ ). Кроме того, был исследован состав с индексом ВСЛ-60 — аналог базового состава ВСО-60, в котором октоген заменен более мощным индивидуальным ВВ.

**Детонационные характеристики.** Скорость детонации  $D$  модельных ВС определяли методом непрерывной фоторегистрации на открытых зарядах диаметром  $d$  от 20 до 40 мм и длиной до 300 мм. С увеличением  $d$  скорость детонации возрастала, что позволило по зависимостям  $D = f(1/d)$  оценить предельные диаметры ВС, которые составили более 30...40 мм для ВС без Al и более 50 мм для смесей с 20% Al. Опытные данные по  $D$ , отвечающие максимальным в проведенных экспериментах значениям  $d$  при пористости  $\Pi \approx 0, \approx 5$  и  $8...10\%$ , и значения  $D$ , экстраполированные на  $d \rightarrow \infty$ , представлены на рис. 1, *a*. Для сравнения на рис. 1, *a* и *b* (для составов октоген/Al из [10, 11] при  $\Pi = 5...7\%$ ) приведены значения  $D$ , вычисленные по термодинамической методике [7] в предположениях: 1) идеальная детонация (с полным химическим и тепловым равновесием в продуктах детонации (ПД)); 2) неидеальная детонация с заданным химическим и тепловым неравновесием Al в смеси с ПД (Al рассматривался как химическая инертная ударно-сжимаемая добавка).

Результаты термодинамического расчета, выполненного по уравнению состояния ПД в форме ВКВ, с достаточно хорошей для инженерных задач точностью коррелируют с экспериментальными значениями  $D$  для мощных индивидуальных ВВ (и их смесей) [7] и ряда баллистических ТРТ, детонирующих в идеальном режиме, а также для двух- (трех-) компонентных смесей типа ВВ–Al (ВВ–Al–флегматизатор) при их расчете в режиме неидеальной детонации с инертным поведением Al во фронте ДВ (см. [7–9] и рис. 1, *b*). Однако для ВС, содержащих в качестве добавок к октогену помимо Al еще и неорганический окислитель, значения  $D_{\text{эксп}} (d \rightarrow \infty)$  (см. рис. 1, *a*) оказались не столь



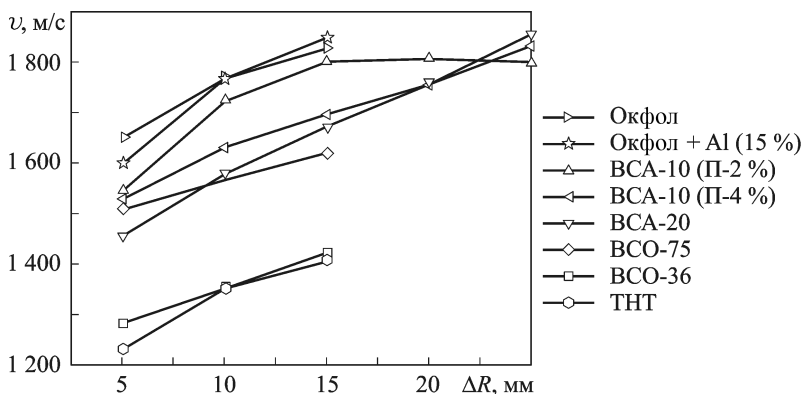
**Рис. 1. Зависимости скорости детонации составов типа ВСА (а) и октогена (б) от содержания Al:**

$a$  — расчет: --- — идеальная детонация; — — неидеальная детонация; эксперимент:  $\circ$  — Al — 0%,  $\Pi = 10\%$ ,  $d = 30$  мм;  $\square$  — Al — 10%,  $\Pi = 8\%$ ,  $d = 30$  мм;  $\blacksquare$  — Al — 10%,  $\Pi = 8\%$ ,  $d \rightarrow \infty$ ;  $\triangle$  — Al — 20%,  $\Pi = 5\%$ ,  $d = 40$  мм;  $\nabla$  — Al — 20%,  $\Pi = 0\%$ ,  $d \rightarrow \infty$ ;

$b$  — расчет: — — идеальная детонация; ··· — неидеальная детонация; эксперимент [10] (дисперсность Al):  $\triangle$  — 150 мкм;  $\square$  — 15 мкм;  $\diamond$  — 5...7 мкм;  $\circ$  — 0,5 мкм

однозначны (в плане идентификации степени неидеальности режима детонации), что обусловлено взаимозависимым влиянием на экспериментальные скорости  $D$  сразу двух факторов: ограниченного диаметра заряда и немонотонного характера энерговыделения в ДВ [7–9]. При этом снижение расчетных значений скорости детонации и давления Чепмена–Жуге (вопреки ожидаемому из классических представлений ( $D \sim Q^{1/2}$  и  $p \sim Q$ ) повышению), имеющее место при идеальном режиме по сравнению с неидеальным, вследствие аномальности термодинамических свойств ПД алюминизированных ВВ [7], для составов типа ВСА, содержащих окислитель, заметно меньше, чем для смесей октоген–Al ( $\Delta D \approx 200$  и  $\approx 400$  м/с, соответственно, при 20% Al).

Отметим, что данные факторы — аномальность свойств ПД и немонотонность энерговыделения (вследствие вторичных реакций) — влияют не только на параметры фронта ДВ [7], но и на весь профиль давления в зафронтной области течения в зарядах смесевых ВС и, как следствие, на их метательное и бризантно-дробящее действие [8–11]. Однако отмеченные макрокинетические и газодинамические



**Рис. 2.** Зависимости скорости разлета оболочки Т-20 от расстояния  $\Delta R$  для ВС на основе ТРТ по сравнению с базовыми ВВ

факторы не могут быть непосредственно учтены в рамках классического термодинамического подхода, использующего в качестве исходных данных лишь элементарный химический состав, энтальпию образования и плотность ВВ (или ВС). В то же время комбинированные термо-газодинамические подходы, например [8, 9], апробированные на двойных системах ВВ–Al, применительно к более сложным, многокомпонентным металлизированным ВС типа ТРТ, термобарических составов (ТБС) и пластизольных ВС на сегодняшний день еще не достаточно совершенны и продолжают активно развиваться.

**Метательная способность (МС).** Экспериментальные исследования МС составов на основе ТРТ проводились по методике Т-20 (аналог “цилиндр-теста”) с одновременной фоторегистрацией двух процессов – скорости детонации исследуемого ВС и скорости  $v$  разлета оболочки. На рис. 2 приведены полученные зависимости  $v$  от приращения радиуса  $\Delta R = R - R_0$  для четырех модельных ВС (при пористости образцов 2...5%) по сравнению с базовыми ВВ (данные для ТНТ, октогена и смеси октогена с 15% Al брались по [7, 10]). Из краткого анализа рис. 2 следует, что МС исследованных образцов ВС зависит от их рецептурного состава, пористости заряда и базы разгона. Непосредственное сравнение показывает, что в начале процесса ( $\Delta R = 5$  мм) скорость оболочки для модельных ВС на 5...10% ниже, чем  $v$  для октогена и его смеси с 15% Al [10, 11]. Однако на более поздних стадиях ( $\Delta R > 20$  мм) различие в скоростях метания заметно уменьшается, при этом максимальные зарегистрированные  $v$  для ВСА-10 и ВСА-20 достигают значений 1800...1900 м/с, приближаясь к уровню для чистого октогена и даже несколько превышая его, что качественно согласуется с результатами проведенной термодинамической оценки МС по энергии Гарни расширяющихся ПД.

**Бризантно-дробящее действие.** Как известно, наиболее обоснованным и в то же время доступным экспериментальным методом срав-

нительного определения дробящих свойств штатных и новых перспективных ВС, предназначенных для снаряжения О и ОФ артиллерийских снарядов и других типов БП с корпусами естественного дробления, являются испытания в стандартном осколочном цилиндре (СОЦ или RSFC — Russian Standard Fragmenting Cylinder) закрытого типа № 12 [7, 12].

Оценка эффективности дробящего действия новых ВС проводилась в сравнении с данными для хорошо изученных штатных ВВ: ТНТ, окфол и А-IX-2. Осколочные цилиндры для проведения испытаний новых мощных ВС (ВС — ТРТ) так же, как и в случае штатных ВВ, были изготовлены из снарядной стали С-60 по технологии горячей штамповки.

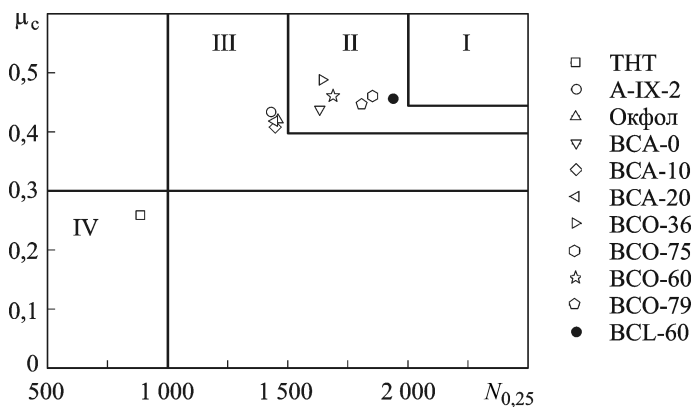
Схема проведения эксперимента приведена в работах [3–6], а схема стандартного цилиндра № 12 — в работе [7].

Суть методики заключается в следующем: исследуемый образец ВС в виде предварительно изготовленной шашки или пластичной массы (без отвердителя) снаряжают в камеру осколочного цилиндра, имеющего следующие размеры: внутренний диаметр 40 мм, наружный 60 мм, длину камеры 160 мм, объем камеры  $200 \text{ см}^3$ , толщину стенки 10 мм, относительную толщину стенки  $1/6$  (пропорции цилиндра RSFC защищены патентом № 2025646 РФ). Открытый торец камеры закрывается завинчивающейся крышкой с центральным отверстием для установки дополнительного детонатора с электродетонатором. Снаряженную сборку устанавливают в малую полиэтиленовую емкость с воздушной полостью диаметром 360 мм, размещенную в заполненной водой большой емкости. В результате взрыва заряда ВС металлический корпус цилиндр дробится на осколки, а формирующееся в воздушной полости осколочное поле тормозится улавливающей средой — водяной оболочкой большой емкости. После подрыва макета в бронекамере проводился сбор и сортировка осколков в соответствии с ГОСТ В 25430–82 по 16 массовым группам: 0,25... 0,5 г; 0,5... 1,0 г; 1... 2 г; 2... 3 г и т.д. Более подробно теоретические и методические вопросы применения осколочных цилиндров изложены в работах [7, 12].

Оценку эффективности дробящего действия ВС — ТРТ проводили на основе количественных характеристик осколочных масс, собранных после опыта и составляющих 95–96% массы корпуса цилиндра:

$N_{0,25}$ ,  $N_{0,5}$ ,  $N_{1,0}$  — число осколков с массой  $m > 0,25 \text{ г}$ ,  $m > 0,5 \text{ г}$  и  $m > 1,0 \text{ г}$ , соответственно;

$\mu_m$ ,  $\mu_c$ ,  $\mu_k$  — относительные содержания мелкой ( $m \leq 1 \text{ г}$ ), средней ( $m = 1 \dots 4 \text{ г}$ ) и крупной ( $m > 4 \text{ г}$ ) фракций осколков.



**Рис. 3. Классификационная диаграмма качества дробления стандартного цилиндра № 12:**

I, II, III, IV — области высококачественного, качественного, удовлетворительного и неудовлетворительного дроблений, соответственно

Дополнительно определяли также морфологические характеристики осколков: среднюю длину ( $l_{20}$ ) для выборки 20 наиболее длинных осколков, максимальное относительное удлинение  $\lambda$  и др.

Результаты исследований осколочной эффективности ВС по сравнению с данными для штатных ВВ (ТНТ и окфол из [7] и А-IX-2) приведены на классификационной диаграмме качества дробления СОЦ (рис. 3), а более подробно изложены в работах [3–6].

Из рис. 3 следует, что по основным осколочным характеристикам ( $N_{0,25}$ ,  $\mu_c$ ) дробящее действие исследованных образцов ВСА-10 и ВСА-20 существенно превышает уровень ТНТ и соответствует уровням мощных штатных прессованных ВВ: А-IX-2 и окфол (данные для ТНТ и окфола цитированы по [7]). Осколочные характеристики составов ВСА-0, ВСО-36, ВСО-60 и в особенности ВСО-79, ВСО-75 и ВСЛ-60 выше, чем у данных штатных ВВ и располагаются во II качественной области дробления. Увеличение содержания октогена в ВС, как и следовало ожидать, приводит к возрастанию значений основных осколочных характеристик —  $N_{0,25}$  и  $\mu_c$ . Отметим, что все изученные ВС на основе компонентов ТРТ показали высокое содержание средней фракции, являющейся наиболее продуктивной частью осколочной массы.

**Представление осколочных спектров RSFC с помощью распределения Вейбулла и гиперэкспоненциальной модели.** Для дальнейшей оценки осколочной эффективности новых ВС (с пересчетом данных подрыва цилиндров на ОФ-снаряды) необходим аппарат представления осколочных спектров. В настоящее время для описания спектров наиболее широко используется распределение Вейбулла:

$$f(m) = \frac{\Lambda}{m_0} \left( \frac{m}{m_0} \right)^{\Lambda-1} e^{-\left( \frac{m}{m_0} \right)^\Lambda},$$

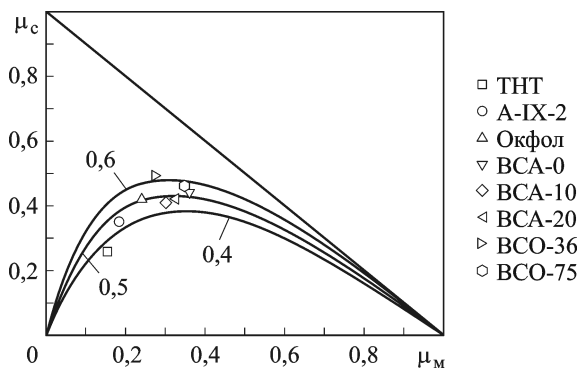


Рис. 4. Треугольная фракционная диаграмма

где  $m_0$  — характеристическая масса распределения;  $\Lambda$  — показатель однородности спектра.

Математическое ожидание массы осколка для распределения Вейбулла определяется как

$$\langle m \rangle = m_0 \Gamma \left( 1 + \frac{1}{\Lambda} \right).$$

Результаты статистической обработки осколочных спектров, представленные на рис. 4 и в табл. 1, показывают, что распределение числа осколков по их массе в принципе удовлетворительно описывается распределением Вейбулла. Однако при этом значения показателя  $\Lambda$  (показателя качества фрагментации цилиндра) для различных ВС оказались сильно различающимися. Для составов ВСА-10 и ВСА-20 значение  $\Lambda$

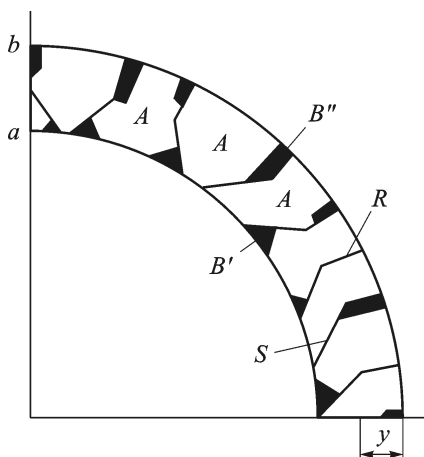
Таблица 1

**Параметры распределения осколков по закону Вейбулла**

Индекс ВС	$m_0$	$\Lambda$	$\langle m \rangle$	$\chi^2$	$R$	$N_{0,25}^{\Gamma}$	$\frac{N_{0,25}^{\Gamma}}{N_{0,25}^{\text{факт}}}$
А-IX-2	0,67	0,575	1,068	7,25	0,36	1364	1,008
ВСА-20	0,47	0,53	0,849	4,02	0,57	1480	1,022
ВСА-10	0,46	0,525	0,844	3,25	0,79	1473	1,015
ВСО-36	0,67	0,66	0,900	3,7	0,66	1694	1,029
ВСО-60 $a$	0,4	0,56	0,663	11	1,4	1798	1,027
ВСО-60 $b$	0,55	0,595	0,837	7,75	0,51	1643	1,011
ВСО-75	0,41	0,59	0,631	10,6	1,3	1931	1,041
ВСL-60 $a$	0,37	0,57	0,598	17	3,2	1934	1,040
ВСL-60 $b$	0,4	0,62	0,577	20,3	4,1	2108	1,052

Примечание. Для составов ВСО-60 и ВСL-60 на рис. 3 приведены средние значения  $\mu_c$  и  $N_{0,25}$ , определенные по двум опытам ( $a$  и  $b$ ).





**Рис. 5. Основные (*A*) и сопутствующие (*B*) осколки СОЦ;**

*R* — поверхности хрупкого отрывного разрушения; *S* — поверхность сдвигового разрушения по площадкам скольжения; *y* — глубина зоны отрывного разрушения

выше, чем у ТНТ, и примерно такое же, как у окфола (0,5). Более высокие, чем у окфола, значения  $\Lambda$  (0,6) получены для других модельных составов (ВСА-0, ВСО-36, ВСО-75).

Кроме того, как известно, распределение Вейбулла является унимодальным и в принципе не может описывать бимодальные осколочные спектры (с двумя выраженными модами плотности  $u(m)$ , отвечающими морфологическим совокупностям осколков СОЦ типа *A* и *B*, показанным на рис. 5).

В общем случае, согласно [7, 11–14], в спектре осколков СОЦ всегда можно выделить две разнородные морфологические совокупности осколков – крупные (основные, квазирегулярные) осколки типа *A*, образованные магистральными трещинами и содержащие обе исходные поверхности цилиндра, и сопутствующие мелкие осколки типа *B*, содержащие одну исходную поверхность (см. рис. 5). Спектр осколков типа *B* включает в себя: *B'* – осколки из контактной зоны, примыкающей к заряду ВВ, образованные поверхностями сдвига, и *B''* – осколки зоны, расположенной у внешней поверхности цилиндра, образованные в основном (для среднеуглеродистых и высокоуглеродистых сталей) хрупкими отрывами радиального направления.

В связи с этим значительный интерес представляет вопрос о возможности описания полученного для ВС – ТРТ распределения масс осколков СОЦ новой статистической моделью осколочного спектра, предложенной В.А.Одинцовым [12–15]. Плотность распределения в новой гиперэкспоненциальной статистической модели имеет вид

$$f(m) = \frac{\xi}{m_a} e^{-\frac{m}{m_a}} + \frac{1 - \xi}{m_b} e^{-\frac{m}{m_b}}.$$

Здесь  $m_a$ ,  $m_b$  – математические ожидания масс осколков типа *A* (основных, квазирегулярных) и типа *B* (мелких, сопутствующих);  $\xi$  – относительное число осколков типа *A*.

Закон распределения осколков по массе в числовой форме  $F(m)$  при суперпозиции двух экспоненциальных спектров имеет вид

$$F(m) = 1 - \xi \exp \left\{ - \left( \frac{m}{m_a} \right) \right\} - (1 - \xi) \exp \left\{ - \left( \frac{m}{m_b} \right) \right\}.$$

Подбор параметров  $m_a$ ,  $m_b$ ,  $\xi$  в гиперэкспоненциальной модели проводился по критерию  $\chi^2$  Пирсона:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(N_i^{\text{факт}} - N_i^{\Gamma})^2}{N_i^{\Gamma}} = f(m_a, m_b, \xi) = \min.$$

Здесь  $k$  — число массовых групп ( $k = 9$ );  $N_i^{\text{факт}}$ ,  $N_i^{\Gamma}$  — соответственно числа осколков в  $i$ -й массовой группе — экспериментальное (фактическое) и расчетное (гипотетическое).

Проверка правдоподобия гипотезы проводится по критерию Романовского

$$R = \frac{|\chi^2 - r|}{\sqrt{2r}} \leq 3,$$

где  $r = k - s - 1$ ;  $k$  — число групп;  $s$  — число определяемых параметров распределения.

Линии уровня  $\chi^2 = f(m_a, m_b)$  для одного из модельных ВС — ТРТ приведены на рис. 6.

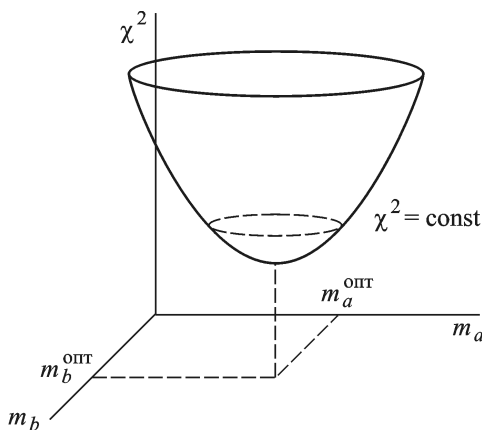
Гиперэкспоненциальное распределение было предложено В.А. Одинцовым в 1982 г. и опубликовано в работах [13–15]. Аналогичное распределение независимо от этих работ предложено Д. Грэди, которое вошло в его монографию [16]. Интересно отметить, что для иллюстрации бимодальных спектров он использовал данные по осколочному цилиндру № 12.

В.А. Одинцовым также было высказано предположение, что для значительного числа сочетаний металл–ВВ значение  $\xi$  может быть зафиксировано. Это предположение было подтверждено экспериментами в ГосНИИ “Кристалл”, где для большого числа составов на основе гексогена и октогена и корпусов цилиндров из сталей С-60 и 80Г2С было показано постоянство значения  $\xi = 0,5$ .

Полученные в настоящей работе значения параметров гиперэкспоненциального распределения осколочных спектров для использованных в испытаниях по методике RSFC штатных и новых ВС представлены в табл. 2.

Число осколков в массовой группе определялось по формуле:

$$N_{m_1 - m_2}^{\Gamma} = N_0 \left[ \xi \left( e^{-\frac{m_1}{m_a}} - e^{-\frac{m_2}{m_a}} \right) + (1 - \xi) \left( e^{-\frac{m_1}{m_b}} - e^{-\frac{m_2}{m_b}} \right) \right].$$



$$\xi = 0,5; \chi^2 = 23,2; m_a = 2; m_b = 0,4; R = 5;$$

$$N_{0,25}^\Gamma = 1518; \langle m \rangle = 1,2$$

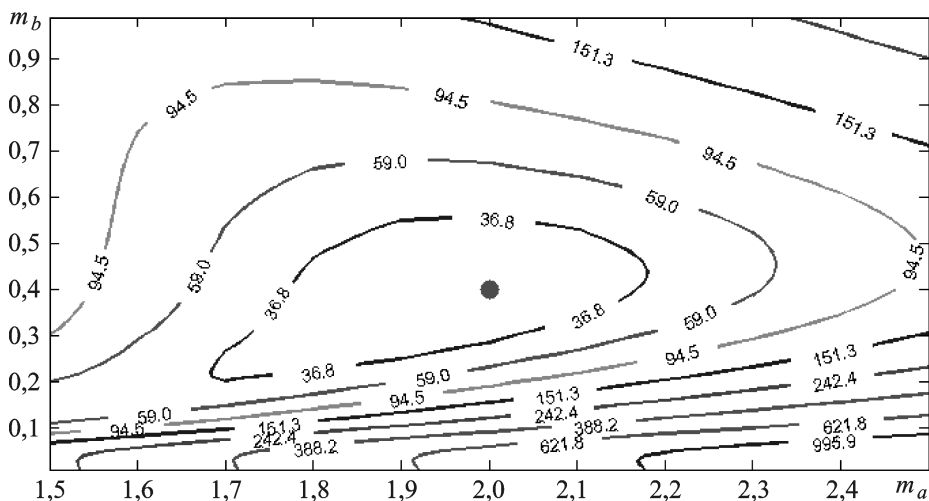


Рис. 6. Линии уровня  $\chi^2 = f(m_a, m_b)$  при  $\xi = 0,5$  для состава ВСА-20

Здесь  $N_0$  — теоретическое число осколков, имеющих массу больше 0:

$$N_0 = M_0 / \langle m \rangle,$$

где  $M_0$  — масса корпуса цилиндра;  $\langle m \rangle$  — математическое ожидание массы осколка, определяемое для гиперэкспоненциального распределения по формуле

$$\langle m \rangle = \xi m_a + (1 - \xi) m_b.$$

Важной контрольной операцией является определение гипотетического числа эффективных осколков  $N_{0,25}^\Gamma$ . Оно определяется по формуле (при  $\xi = 0,5$ ):

$$N_{0,25}^\Gamma = \frac{N_0}{2} \left( e^{-\frac{0,25}{m_a}} + e^{-\frac{0,25}{m_b}} \right).$$

**Параметры распределения осколков по модели Одинцова–Грэди при  $\xi = 0,5$** 

Индекс ВС	$\chi^2$	$m_a$	$m_b$	$R$	$N_{0,25}^r$	$\frac{N_{0,25}^r}{N_{0,25}^{\text{факт}}}$	$\langle m \rangle$
A-IX-2	12	2,2	0,38	1,7	1405	1,039	1,290
BCA-20	23,2	2	0,4	5	1518	1,048	1,200
BCA-10	18,3	2	0,39	3,5	1515	1,044	1,195
BCO-36	10,4	1,7	0,46	1,3	1718	1,044	1,080
BCO-60a	29,3	1,5	0,34	6,7	1852	1,058	0,920
BCO-60б	15,9	1,7	0,37	2,9	1704	1,048	1,035
BCO-75	24,8	1,4	0,35	5,4	1947	1,050	0,875
BCL-60a	28	1,3	0,25	6,3	1978	1,064	0,775
BCL-60б	27,6	1	0,14	6,2	2134	1,065	0,570

Как следует из проведенного сравнения чисел  $N_{0,25}^r$  и  $N_{0,25}^{\text{факт}}$  для исследованных составов (см. табл. 2), их расхождение не превышает 6,5%. Таким образом, статистическая обработка подтверждает качественное согласие гиперэкспоненциальной модели Одинцова–Грэди с экспериментом.

В плане дальнейшего развития исследований бризантно-дробящих свойств новых мощных ВС на основе ТРТ как в теоретическом, так и в практическом отношении представляет интерес установление зависимости значений параметров распределения осколочных спектров СОЦ № 12 (а в перспективе О- и ОФ-снарядов с корпусами из стали С-60) от основных детонационных и энергетических характеристик ВС — ТРТ, определяемых исходным компонентным составом, начальной плотностью и дисперсностью компонентов заряда.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. *Новые тенденции в области создания перспективных высокоэнергетических материалов* / М.Б. Талавар, Р. Сивабалан, М. Аннияппан и др. // ФГВ. 2007. Т. 43, № 1. С. 72–85.
2. *Алюминизированные литые взрывчатые вещества (обзор)* / П.П. Вадхе, Р.Б. Павар, Р.К. Синха и др. // ФГВ. 2008. Т. 44, № 4. С. 98–115.
3. *Дробящее действие баллистических и смесевых ракетных топлив в стандартных осколочных цилиндрах RSFC* / В.А. Одинцов, Н.А. Имховик, В.М. Меркулов и др. // Оборонная техника. 2008. № 1. С. 30–41.
4. *Экспериментально-теоретические исследования взрывчатых свойств, бризантного и метательного действия многокомпонентных ВС на основе ТРТ* / Ю.М. Милехин, В.М. Меркулов, А.Н. Осавчук и др. // Труды Междунар. конф. “XI Харитоновские тематические научные чтения”. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2009. С. 5–10.

5. *Свойства* новых взрывчатых составов, разработанных по технологии ТРТ / Ю.М. Милехин, В.М. Меркулов, Ю.Е. Зайчиков и др. // Сб. докл. VI Науч. конф. ВРЦ РАРАН “Современные методы проектирования и отработки ракетно-артиллерийского вооружения”. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2009. С. 512–518.
6. *Экспериментально-теоретические исследования* взрывчатых свойств, дробящего и метательного действия смесевых составов на основе компонентов твердого ракетного топлива / А.Н. Осавчук, В.М. Меркулов, Ю.Е. Зайчиков и др. // Горение и взрыв. Вып. 3; под ред. С.М. Фролова. М.: ТОРУС ПРЕСС, 2010. С. 246–253.
7. *Физика взрыва*: в 2 т. / С.Г. Андреев, А.В. Бабкин, Ф.А. Баум и др.; ред. Л.П. Орленко. М.: Физматлит, 2002. Т. 1. 823 с.; Т. 2. 656 с.
8. *Имховик Н.А.* Об особенностях влияния добавок высокодисперсных металлов на структуру течения и режим распространения детонационных волн в смесевых ВВ // Хим. физика. 2005. Т. 24. № 11. С. 3–10.
9. *Имховик Н.А.* Моделирование детонационных свойств и особенностей метательного действия металлизированных ВВ как систем с немонотонным энерговыделением // Труды междунар. конф. “XI Харитоновские тематические научные чтения. Экстремальные состояния вещества. Детонация. Ударные волны”. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2009. С. 182–188.
10. *Gogulya M.F., Dolgoborodov A.Yu., Brazhnikov M.A., Baudin G.* Detonation waves in HMX/Al mixtures (Pressure and temperature measurements) // XI (Intern.) Detonation Symposium. Colorado, 1998. P. 127–133.
11. *Метательная* способность и теплота взрывчатого разложения алюминизированных ВВ / М.Н. Махов, М.Ф. Гоголя, А.Ю. Долгобородов и др. // ФГВ. 2004. Т. 40, № 4. С. 96–105.
12. *Одинцов В.А.* Моделирование процессов фрагментации с помощью унифицированных цилиндров: метод. указ. к лабораторным работам. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1991. 56 с.
13. *Одинцов В.А.* Двухкомпонентная модель спектра разрушения цилиндров // Труды МВТУ № 387 Механика импульсных процессов. М.: МВТУ им. Н.Э. Баумана, 1982.
14. *Одинцов В.А.* Бимодальное распределение фрагментов цилиндров // ФГВ. 1991. № 5. С. 118–122.
15. *Одинцов В.А.* Двумерное распределение осколков цилиндров по массе и характеристике формы // ФГВ. 1993. № 1. С. 129–133.
16. *Dennis Grady.* Fragmentation of rings and shells: The legacy of N.F. Mott Publisher: Springer; 1st Edition. (November 23, 2006).

Статья поступила в редакцию 27.11.2012