

УДК: 623.4.082.6

DOI: 10.53816/20753608_2022_2_83

ОБОСНОВАНИЕ ТРЕБОВАНИЙ К ТОЧНОСТИ ПАРАМЕТРОВ КОНСТРУКЦИИ КУМУЛЯТИВНЫХ ЗАРЯДОВ С ПОВЫШЕННЫМ ПРОБИВНЫМ ДЕЙСТВИЕМ

SUBSTANTIATION OF REQUIREMENTS TO ACCURACY SHAPED CHARGES WITH INCREASED PUNCTURE ACTION DESIGN PARAMETERS

М.А. Бабурин, В.Д. Баскаков, К.А. Карнаухов, чл.-корр. РАРАН В.А. Тарасов

МГТУ им. Н.Э. Баумана

M.A. Baburin, V.D. Baskakov, K.A. Karnaukhov, V.A. Tarasov

Для лабораторного макета кумулятивного заряда методом численного моделирования вероятностных характеристик его пробивного действия определены фокусные кривые, характеризующие толщину брони, пробиваемую с вероятностью 80 %, в зависимости от дистанции подрыва, и разработаны диаграммы вкладов отдельных погрешностей параметров конструкции заряда в снижение его пробивного действия. Проанализированы два подхода к преобразованию таких диаграмм, позволяющих назначить допуски на параметры конструкции заряда для повышения его пробивного действия.

Ключевые слова: кумулятивный заряд, фокусные кривые, диаграммы вкладов, допуски параметров конструкции.

For the laboratory model of shaped charge, by the method of numerical modeling probabilistic characteristics puncture action, focal curves were determined that characterize the thickness of armor punctured with 80 % probability, depending on the detonation distance, and diagrams of the contributions design parameters individual errors were developed to reduce its puncture action. Two approaches to converting such diagrams were analyzed, allowing for rational tolerances on the parameters shaped charge design to increase its puncture effect.

Keywords: shaped charge, focal curves, tab charts, design parameters tolerance.

Артиллерийские кумулятивные боеприпасы остаются одним из важнейших средств борьбы с бронированной техникой. Их пробивное действие во многом зависит от точности параметров конструкции, отвечающих за симметричность кумулятивной струи и стабильность ее деформационной способности. К таким параметрам относятся, прежде всего, разностенность (окружная разнотолщинность) кумулятивной облицовки, химическая чистота и предельная величина зерна (балл зерна) меди, из которой изготовлена облицовка, разностенность слоя взрывчатого вещества (ВВ) в области облицовки, разнотолщинность ВВ, а также разностенность корпуса [1].

Учитывая технологическую природу формирования этих параметров, в ряде работ их называют технологическими погрешностями [2].

Повысить пробивное действие кумулятивных боеприпасов можно ужесточением допусков на указанные параметры конструкции кумулятивных зарядов (КЗ). Однако одного и того же уровня бронепробития можно достичь различным сочетанием допусков. Поэтому разработчики боеприпасов должны решить сложную задачу обоснованного выбора такого сочетания допусков, которое, помимо обеспечения бронепробития, должно быть рациональным с точки зрения производственной реализации и определять тем

самым, наименее затратные направления совершенствования технологии изготовления кумулятивных боеприпасов [11–13].

Целью данной работы является обоснование подходов к выбору рационального сочетания допусков на параметры конструкции КЗ боеприпасов с повышенным пробивным действием и оценка ожидаемого уровня бронепробития [14, 15].

В силу большого числа параметров конструкции КЗ, определяющих симметрию процессов формирования, движения и взаимодействия с преградой кумулятивных поражающих элементов, а также учитывая стохастическую природу этих параметров, основным методом исследований вероятностных характеристик бронепробития КЗ, формирующих кумулятивные поражающие элементы, является численное моделирование [1, 3–5]. В данной работе при проведении исследований применялась методика, подробно изложенная в работе [1] и реализованная в специализированном программно-математическом комплексе StJet, созданном в МГТУ им. Н.Э. Баумана и работающем следующим образом. С помощью датчиков псевдослучайных чисел в пределах полей допусков моделируются конкретные значения параметров конструкции КЗ, а также их сочетание. Затем определяется распределение осевой и радиальной скорости вдоль кумулятивной струи, форма ее поперечного сечения и оценивается предельное удлинение струи. После этого вычисляется значение пробивного действия L_n КЗ с учетом асимметрий кумулятивной струи. Далее расчеты, начиная с моделирования случайных значений параметров конструкции КЗ, многократно повторяются и формируется статистический ряд случайных значений пробивного действия $L_1, L_2, \dots, L_n, \dots, L_N$. В процессе математической обработки данного ряда определяются вероятностные характеристики пробивного действия, в том числе толщина брони L_{P1} , пробиваемая с заданной вероятностью $P1$.

Объектом исследования в настоящей работе являлся КЗ, схема которого представлена на рис. 1. Основные параметры его конструкции: калибр $d = 52$ мм; диаметр линзы $d_n = 16$ мм; толщина корпуса $\delta_k = 3$ мм; толщина облицовки в вершине $\delta_b = 1,13$ мм; толщина облицовки в основании $\delta_{oc} = 1,85$ мм; угол раствора облицовки $2\alpha = 44^\circ$; скорость детонации ВВ $D = 8900$ м/с;

плотность ВВ $\rho_{ВВ} = 1720$ кг/м³. При расчетах также принималось, что облицовка выполнена из меди М1, твердость брони составляла 250 НВ. Допуски x_{ij} (i — индекс варианта КЗ, j — индекс параметра конструкции) параметров конструкции КЗ, влияющих на симметричность кумулятивной струи и стабильность ее деформационной способности, приведены в табл. 1. В процессе исследований основной вероятностной характеристикой эффективности действия КЗ принималась величина L_{80} — толщина брони L_{P1} , пробиваемая с вероятностью $P1 = 80\%$. Значение L_{80} определялось при обработке статистического ряда, состоящего из $N = 3006$ случайных значений пробивного действия L_n .

Результаты расчетов вероятностных характеристик пробивного действия КЗ, допуски параметров конструкции которого соответствуют варианту $i = 1$ в табл. 1, представлены в безразмерном виде на рис. 2, графиком $\bar{1}$ — фокусной кривой $\bar{L}_{80} = \bar{L}_{80}(F)$, где $\bar{L}_{80} = L_{80} / d$, $\bar{F} = F / d$. График имеет четко выраженный

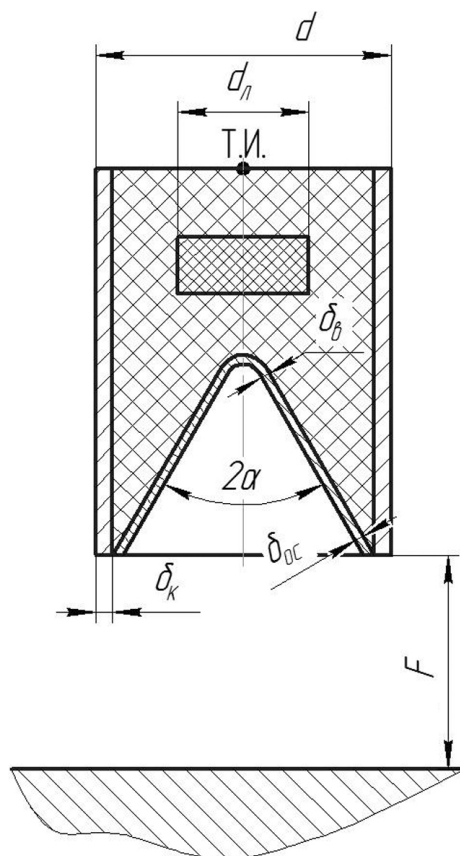


Рис. 1. Расчетная схема КЗ
(Т.И. — точка иницирования ВВ)

Таблица 1

Допуски x_{ij} параметров конструкции вариантов конструкции КЗ с индексом i и значения индекса j этих параметров

i индекс варианта КЗ	Разностенность облицовки, мм $j = 1$	Величина зерна меди, мм $j = 2$	Разностенность ВВ, мм $j = 3$	Разноплотность ВВ, кг/м ³ $j = 4$	Разностенность корпуса, мм $j = 5$
1	0,02	0,1	0,2	10	0,1
2	0,0099	0,1	0,2	5,1	0,1
3	0,0113	0,1	0,2	3,1	0,1

максимум $\bar{L}_{80} = L_{80\max} / d = \bar{L}_{80\max} = 5,88$ на фокусном расстоянии $\bar{F} = \bar{F}_{\max} = 3,38$. Наличие выраженного экстремума у фокусной кривой характерно для КЗ низкой и средней точности, к которым можно отнести и анализируемый КЗ. Будем считать данный вариант конструкции базовым и проведем его анализ с целью поиска рационального сочетания допусков на параметры конструкции для повышения пробивного действия КЗ.

КЗ варианта $i = 1$ имеет существенный запас повышения пробивного действия за счет ужесточения требований к точности параметров его конструкции. Этот запас наглядно демонстрирует фокусная кривая 3 на рис. 2, характеризующая пробивное действие идеально изготовленного КЗ, допуски параметров конструкции которого равны нулю (КЗ варианта $i = 4$). Например, на фокусном расстоянии $\bar{F} = 3,38$, соответствующем максимуму кривой 1 на рис. 2, запас повышения пробивного действия КЗ составляет величину $\Delta \bar{L} = \Delta L / d = 2,25$ (ΔL — разница между значе-

ниями L_{80} для вариантов $i = 4$ и $i = 1$). Абсолютное значение L_{80} бронепробития КЗ варианта $i = 4$ на этом фокусном расстоянии составляет $L_{\max} = 423$ мм. С увеличением фокусного расстояния запас пробивного действия существенно возрастает: так, при $\bar{F} = 8,5$ он уже составляет $\Delta \bar{L} = 6,46$.

Вклад отдельных параметров конструкции КЗ (варианта $i = 1$), представленных в табл. 1, в снижение пробивного действия на фокусном расстоянии $\bar{F} = 3,38$ различен. Оценим его с помощью приближенной линейной зависимости пробивного действия от параметров конструкции КЗ, которую можно представить в следующем виде:

$$\tilde{L}_{80,i} = 1 - \sum_{j=1}^5 a_{ij} \left(\frac{x_{ij}}{x_{1j}} \right), \quad (1)$$

где $\tilde{L}_{80,i} = L_{80,i} / L_{\max}$; $L_{80,i}$ — толщина брони, пробиваемой с вероятностью 80 % i -м вариантом КЗ; a_{ij} — коэффициент влияния x_{ij} допуска j -го параметра конструкции на вероятностную характеристику бронепробития i -го варианта КЗ.

Расчеты, выполненные по формуле (1) и в программном комплексе StJet показывают, что с помощью (1) можно оценить значение $\tilde{L}_{80,i}$ с погрешностью не более 8 % для всех анализируемых в статье вариантов КЗ ($i = 1, 2, 3$).

Числовые значения коэффициентов a_{1j} , полученные в комплексе StJet для варианта КЗ с индексом $i = 1$ на фокусном расстоянии $\bar{F} = 3,38$, представлены в табл. 2. Коэффициенты a_{2j} , a_{3j} для КЗ с иными значениями допусков на параметры конструкции получены ниже путем расчетной корректировки коэффициентов a_{1j} .

Для наглядности вклад j -го параметра конструкции в снижение пробивного действия КЗ с индексом $i = 1$ представлен в виде диаграммы,

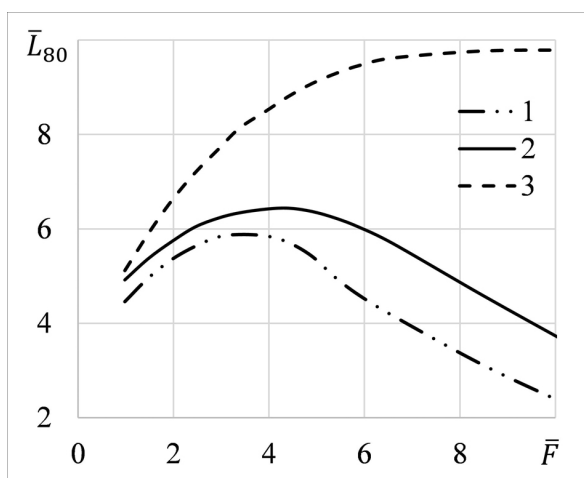


Рис. 2. Фокусные кривые для различных вариантов КЗ: 1 — $i = 1$; 2 — $i = 2, 3$; 3 — $i = 4$

Таблица 2

Значения коэффициентов a_{ij} влияния j -го параметра конструкции на его пробивное действие i -го варианта КЗ

i индекс КЗ	$j = 1$	$j = 2$	$j = 3$	$j = 4$	$j = 5$
1	0,103	0,017	0,051	0,100	0,006
2	0,051	0,017	0,051	0,051	0,006
3	0,058	0,017	0,051	0,031	0,006

в которой общее снижение $\tilde{L}_{80,1}$ по сравнению с 1 принято за величину $P = 100\%$ (рис. 3).

Рис. 3 демонстрирует доминирование трех из пяти параметров конструкции в снижении пробивного действия: разностенности облицовки, разностенности и разноплотности ВВ ($j=1, 3, 4$) соответственно). При ужесточении допусков на указанные параметры можно добиться существенного повышения бронепробития анализируемого варианта КЗ.

В настоящее время при назначении допусков на параметры конструкции КЗ главенствует представление о приоритетном влиянии параметров облицовки на пробивное действие КЗ. Поэтому для КЗ с повышенными требованиями к пробивному действию ужесточают требования к разностенности облицовки, к величине (баллу) зерна меди, а также меняют конструкцию и технологию изготовления облицовок [6, 7]. Однако у анализируемого КЗ, как показано на рис. 3, наибольший вклад в снижение бронепробития вносят в совокупности параметры ВВ, а не облицовки.

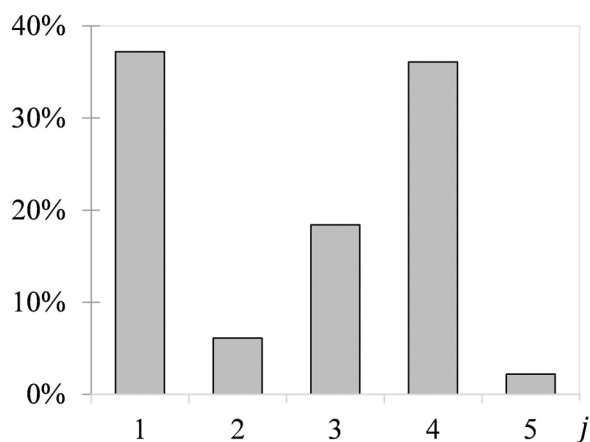


Рис. 3. Диаграмма процентного вклада P каждого j -го параметра конструкции в снижение пробивного действия КЗ с индексом $i=1$

Это усложняет задачу обоснования допусков на параметры конструкции КЗ с повышенным бронепробитием.

Проанализируем два принципиально различных подхода к повышению пробивного действия КЗ, основанных на ужесточении требований к точности параметров их конструкции.

Первый подход основан на целесообразности выравнивания вкладов допусков параметров конструкции в снижение их эксплуатационных характеристик [8]. Применительно к КЗ с индексом $i=1$ целесообразно ограничиться выравниванием вкладов в снижение пробивного действия только трех параметров конструкции с индексами $j=1, 3, 4$. Вклад других параметров ($j=2, 5$) незначителен и составляет менее 10% (рис. 3).

Диаграмма вкладов после выравнивания по параметрам $j=1, 3, 4$, представлена на рис. 4 левыми (темными) столбцами у соответствующего индекса j . Данному КЗ присвоен индекс $i=2$. Допуски параметров конструкции x_{2j} и коэффициенты влияния a_{2j} после выравнивания вкладов представлены, соответственно, в табл. 1, 2.

Фокусная кривая для КЗ $i=2$ отличается некоторыми особенностями (график 2 на рис. 2). Анализ показывает, что ее экстремум, по сравнению с кривой $i=1$, смещен в область больших фокусных расстояний и находится в точке $\bar{F} = 4,41$, величина $\bar{L}_{80} = 6,44$. Сам экстремум менее ярко выражен, что делает максимальное пробивное действие КЗ $i=2$ менее чувствительным к нестабильности фокусного расстояния. На фокусном рассто-

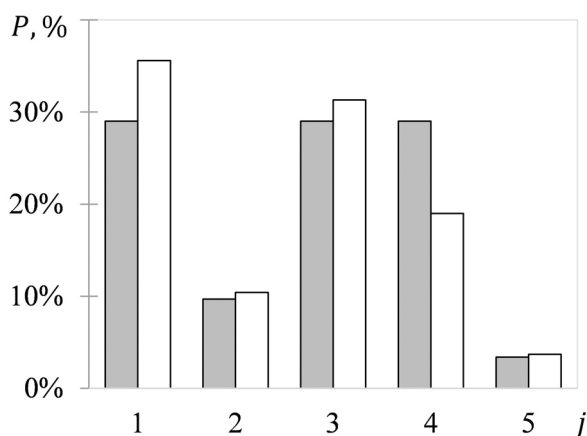


Рис. 4. Диаграммы процентного вклада P каждого j -го параметра конструкции в снижение пробивного действия КЗ с индексами $i=2, 3$

янии $\bar{F} = 3,38$ бронепробитие КЗ $i = 2$ составляет $\bar{L}_{80} = 6,34$, что обеспечивает прирост пробивной способности КЗ $i = 2$ по сравнению с КЗ $i = 1$ на величину $\Delta \bar{L} = -0,46$.

Основной недостаток рассмотренного подхода к обоснованию допусков на параметры конструкции КЗ заключается в том, что затраты на реализацию принятого технического решения не учитываются. Этого недостатка можно избежать, используя другой подход на основе учета финансовых затрат по обеспечению допуска j -го параметра конструкции КЗ с помощью безразмерных коэффициентов Q_j [9, 10]. При ужесточении допуска j -го параметра конструкции КЗ коэффициенты Q_j возрастают. В таблице 3 приведены скорректированные, применительно к КЗ $i = 1$, значения коэффициентов Q_j . Чем больше Q_j , тем больше финансовые затраты на обеспечение допуска x_{ij} .

На основе применения коэффициентов Q_j можно провести сравнение между собой допусков параметров конструкции КЗ. Для этого следует использовать коэффициенты $K_{i,mj}$ рациональности допусков, которые можно представить в следующем виде [9]:

$$K_{i,mj} = x_{ij} / x_{im} = \left(\frac{Q_j \cdot a_{im}}{Q_m \cdot a_{ij}} \right)^{0,5}, \quad (2)$$

где $m = 1 \dots 5$ — индекс допуска параметра конструкции КЗ (аналогичный индексу j), по отношению к которому проводится оценка коэффициентов рациональности.

Расчеты коэффициентов рациональности допусков по формуле (2) для анализируемого варианта КЗ индекса i проводятся следующим обра-

зом. В начале выбирается допуск параметра конструкции, который можно считать рациональным. Например, для варианта КЗ $i = 1$, рациональной можно считать разностенность ВВ ($j = 3$), относительно которой проводилось выше выравнивание вкладов допусков параметров конструкции в снижение пробивного действия. Принимая разностенность ВВ рациональной, следует положить в формуле (2) значение индекса $m = 3$.

Значения коэффициентов рациональности $K_{1,3j}$, рассчитанные для КЗ $i = 1$ по (2) при $m = 3$ с использованием данных табл. 2, 3, приведены в третьей строке табл. 3. В соответствии с данными работы [9], при рациональных допусках на параметры конструкции анализируемого КЗ должно выполняться условие

$$K_{i,mj} = 1. \quad (3)$$

Подставляя (3) в (2), найдем, что рациональные допуски определяет следующая зависимость:

$$a_{ij} = a_{im} \frac{Q_j}{Q_m}. \quad (4)$$

Под рациональным понимается такое сочетание допусков на параметры конструкции КЗ, которое обеспечивает наименьшие финансовые затраты для достижения требуемого уровня бронепробития КЗ по сравнению с другими сочетаниями допусков [9]. Если $K_{i,mj} < 1$, допуск на j -й параметр конструкции КЗ целесообразно ужесточать в соответствии с зависимостью (4). В противном случае, когда $K_{i,mj} > 1$, допуск следует считать избыточно жестким, и его можно расширить, также используя формулу (4). Необходимо, однако, отметить, что расширять допуски параметров конструкции КЗ для повышения его пробивного действия представляется нелогичным шагом. Поэтому, применительно к варианту КЗ $i = 1$, ограничимся ужесточением допусков a_{ij} параметров $j = 1, 4$ (смотри последнюю строку табл. 2). Данному варианту конструкции КЗ присвоен индекс $i = 3$.

Результаты расчетов фокусной кривой $\bar{L}_{80} = \bar{L}_{80}(F)$ для КЗ $i = 3$ показывают, что она с погрешностью не более 1 % совпадает с фокусной кривой КЗ $i = 2$ (рис. 2). При этом диаграммы вкладов параметров конструкции в снижение

Таблица 3

Коэффициенты Q_j финансовых затрат и коэффициенты рациональности $K_{i,mj}$ допуска j -го параметра для вариантов конструкции КЗ $i = 1, 2, 3$ при $m = 3$

j	1	2	3	4	5
Q_j	0,846	0,840	0,744	0,453	0,498
$K_{1,3j}$	0,75	1,840	1,00	0,56	2,385
$K_{2,3j}$	1,066	1,840	1,00	0,786	2,385
$K_{3,3j}$	1,00	1,840	1,00	1,00	2,385

бронепробития у КЗ $i=3$ (правые столбцы у соответствующего индекса j на рис. 4) и КЗ $i=2$ (левые столбцы у индекса j на рис. 4) существенно отличаются между собой. Тем не менее оба варианта модернизации КЗ показывают одно и то же направление, в котором необходимо следовать при разработке боеприпасов с повышенным бронепробитием — необходимо ужесточать допуски разностенности облицовки и разнотенности заряда ВВ.

Представляет интерес оценка коэффициентов $K_{i,mj}$ рациональности допусков на параметры конструкции КЗ $i=2$, назначенных в соответствии с принципом выравнивания вкладов этих допусков в снижение пробивного действия. Коэффициенты рациональности $K_{2,3j}$, рассчитанные по формуле (2) для КЗ $i=2$ и представленные в предпоследней строке табл. 3, показывают, что для допусков параметров $j=1, 4$ значения этих коэффициентов отличаются от 1.

Количественной мерой рациональности допусков параметров конструкции КЗ в целом может служить обобщенный показатель K_{i0} рациональности допусков — среднее значение отклонения коэффициентов рациональности $K_{i,mj}$ от 1:

$$K_{i0} = \frac{1}{J} \sum_{j=1}^J |1 - K_{i,mj}|, \quad (5)$$

где J — количество параметров конструкции с индексом j , регламентированных допусками (в анализируемом случае $J=5$).

Очевидно, что чем меньше значение K_{i0} , тем лучше КЗ с точки зрения рациональности назначенных допусков. Подставляя значения $K_{i,mj}$ из табл. 3 в формулу (5), получим следующие значения K_{i0} : КЗ $i=1$ — $K_{10}=0,583$; КЗ $i=2$ — $K_{20}=0,502$; КЗ $i=3$ — $K_{30}=0,445$.

Таким образом, с позиции достижения наименьших финансовых затрат на обеспечение допусков параметров конструкции, вариант КЗ $i=2$ уступает варианту КЗ $i=3$.

В заключение следует отметить, что проанализированные в статье подходы к назначению допусков на параметры конструкции КЗ с повышенным пробивным действием являются в целом универсальными и применимыми для модернизации высокоточных изделий оборонной, авиационной и ракетно-космической промышленности.

Выводы

На примере анализа КЗ средней точности с помощью расчетных фокусных кривых продемонстрирован резерв повышения пробивного действия за счет ужесточения требований к точности параметров конструкции КЗ. Показано, что предельное значение такого резерва может составлять $\Delta \bar{L}=2,25$ на фокусном расстоянии $\bar{F}=3,38$ и возрастать до $\Delta \bar{L}=6,46$ при $\bar{F}=8,5$.

Проанализированы два подхода к повышению точности параметров конструкции КЗ с увеличенным пробивным действием. Первый из них основан на принципе выравнивания вкладов допусков наиболее значимых для бронепробития параметров конструкции КЗ в пробивное действие, а второй — на обеспечении наименьших финансовых затрат при повышении пробивного действия. Разработанные на основе этих 2-х подходов КЗ повышенной точности позволяют на фокусном расстоянии $\bar{F}=3,38$ увеличить бронепробитие на $\Delta \bar{L}=0,46$.

Показано, что одно из наиболее важных направлений повышения пробивного действия КЗ связано с ужесточением допуска разностенности облицовки до значений 9,9...11,3 мкм и допуска разнотенности заряда ВВ до величин 3,1...5,1 кг/м³.

Литература

1. Тарасов В.А., Дубовской М.А. и др. Влияние технологической наследственности на пробивное действие кумулятивных зарядов // Оборонная техника. 1995. № 4. С. 54–59.
2. Асмоловский Н.А., Баскаков В.Д., Зарубина О.В. Анализ влияния технологических погрешностей менисковых облицовок на динамику взрывного формирования высокоскоростных стержневых элементов // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия Машиностроение. 2015. № 5 (104). С. 72–86.
3. Баскаков В.Д., Зарубина О.В., Карнаухов К.А. и др. Математическое моделирование процесса соударения плоских струй идеальной жидкости // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия Естественные науки. 2016. № 2 (65). С. 79–90.

4. Колпаков В.И., Софьин А.С. и др. Методика оценки влияния погрешностей конструкции снарядоформирующих зарядов на кучность попадания в цель и пробивное действие удлиненных поражающих элементов // Оборонная техника. 2010. № 1–2. С. 90–98.
5. Колпаков В.И., Калугин В.Т., Шикунов Н.В., Софьин А.С. и др. Оценка рациональной формы сверхдлинных поражающих элементов снарядоформирующих зарядов // Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук. 2012. № 1 (71). С. 70–74.
6. Тарасов В.А., Баскаков В.Д., Круглов П.В. Методика проектирования технологии изготовления высокоточных деталей боеприпасов // Оборонная техника. 2000. № 1–2. С. 89–92.
7. Бабурин М.А., Ладов С.В., Никольская Я.М., Фёдоров С.В. и др. Применение профилированных по толщине заготовок для управления толщиной стенки штампемых свинцом оболочковых деталей // Технология металлов. 2016. № 11. С. 2–8.
8. Тарасов В.А., Кашуба Л.А. Теоретические основы технологии ракетостроения: учеб. пособие / Под ред. В.А. Тарасова. — М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. 352 с.
9. Зарубина О.В., Щедрин М.В. и др. Алгоритмы принятия конструкторских и технологических решений по обеспечению рациональной точности боеприпасов // Оборонная техника. 2007. № 3–4. С. 60.
10. Баскаков В.Д., Зарубина О.В., Васильева Т.В. Обоснование и технологическая реализация рациональной точности конструктивных параметров машин // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. 2012. № 9 (9). С. 24–29.
11. Воротилов М.С. Концепция создания кумулятивного заряда с рекордными характеристиками пробития // Известия ТулГУ. Технические науки. 2011. Вып. 2. С. 96–101.
12. Дронова Т.И., Воротилин М.С., Тихомиров Д.М. Математическая модель функционирования кумулятивного заряда с учетом технологических факторов // Вестник ТулГУ. Сер. Актуальные вопросы механики. Вып. 4. Т. 2. 2008. С. 31–36.
13. Поликарпов Ю.Н. и др. Векторная методика анализа влияния технологических отклонений от осесимметричности в кумулятивном заряде на его пробивное действие // В сб. «Оборонный комплекс — научно-техническому прогрессу России». 1999. № 3. С. 3–11.
14. Бабкин А.В., Ладов С.В. и др. Закономерности растяжения и пластического разрушения металлических кумулятивных струй // Прикладная механика и техническая физика. 1999. Т. 40. № 4. С. 25–35.
15. Калашников В.В., Деморецкий Д.А., Ненашев М.В. и др. Теоретическая и экспериментальная оценка эффективности действия взрывных устройств с многослойными кумулятивными облицовками, сформированными детонационным методом // Известия Самарского научного центра РАН. Т. 14. № 1 (2). 2012. С. 610–614.