

УДК 623.462.12:623.468.082.6

doi: 10.53816/20753608\_2025\_1\_127

**УТОЧНЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБЛИКА НОВОЙ УПРАВЛЯЕМОЙ РАКЕТЫ  
НА ОСНОВЕ ВЫБОРА РАЦИОНАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ  
КУМУЛЯТИВНОЙ БОЕВОЙ ЧАСТИ**

**REFINEMENT OF A NEW NON-LINE OF SIGHT MISSILE'S CONFIGURATION  
BASED ON RATIONAL SHAPED CHARGE WARHEAD PARAMETERS**

*По представлению академика РАН В.М. Кашина*

*И.С. Астахов, Г.Л. Павлов, Л.А. Розанов*

*МГТУ им. Н.Э. Баумана*

*I.S. Astakhov, G.L. Pavlov, L.A. Rozanov*

Реализована методика нахождения рациональных параметров боевой части для трех вариантов формирования кумулятивной струи. Показано, что при учете специфики новой ракеты ближней тактической зоны, а именно необходимости разрушения головки самонаведения при срабатывании боевой части и возможности поражать танки, оснащенные активной защитой, перспективен вариант со снарядоформирующей боевой частью.

**Ключевые слова:** управляемая ракета, кумулятивный заряд, рациональные параметры, численное моделирование.

A technique has been implemented for finding rational warhead parameters for three variants of cumulative jet formation. It is shown that, when taking into account the specifics of the new non-line of sight missile, namely the requirement to destroy the seeker after jet formation and to engage tanks with active protection, the variant with a projectile-forming warhead is seen as promising.

**Keywords:** guided missile, shaped charge, rational parameters, numerical simulation.

В настоящее время активно развивается новый вид высокоточного оружия — так называемые многоцелевые управляемые ракеты ближней и тактической зоны (УР БТЗ). Они представляют собой ракеты калибром 180...220 мм и стартовой массой до 200 кг, имеющие максимальную дальность полета 15...75 км и оснащенные как инерциальной навигационной системой, так и головкой самонаведения (ГСН). Такие образцы позволяют на дальностях, характерных для ствольной артиллерии и ракетных систем залпового огня, реализовывать удары по точечным целям при существенно большей

маневренности носителя, чем у традиционных артиллерийских систем. За рубежом уже создан ряд образцов УР БТЗ, таких как сербский ALAS, израильский Spike-NLOS, британский Brimstone-2 наземного базирования.

В России активно ведутся работы по созданию отечественной УР БТЗ. Для повышения тактической гибкости применения такой УР может быть применен блочно-модульный принцип компоновки. В таком случае боевая часть (БЧ) является отдельным модулем, тип которого выбирается в зависимости от предполагаемой цели. Учитывая габариты УР БТЗ, в

качестве одного из таких модулей представляет интерес моноблочная кумулятивная БЧ. Предполагается, что за счет большего калибра, чем у противотанковых УР, ее бронепробитие сохранится на приемлемом уровне, а большая масса обеспечит дополнительное осколочное и фугасное действие.

Масса БЧ является одним из основных начальных параметров, необходимых для осуществления итерационного алгоритма проектирования ракеты. Также от характеристик БЧ напрямую зависит вероятность поражения цели, определение которой для нового образца всегда представляет одновременно актуальную и трудную задачу. Масса кумулятивной БЧ  $m_{БЧ}$  при заданном объеме существенно варьируется в зависимости от толщины кумулятивной облицовки  $\delta$  и угла ее раствора  $2\alpha$ , которые в свою очередь определяют величину бронепробития  $B$ . Объем БЧ  $V_{БЧ}$  назначается конструктором из соображений по размещению на борту ракеты другой полезной нагрузки в рамках блочно-модульного принципа компоновки.

Цель настоящей работы — найти такие параметры БЧ для УР БТЗ, которые обеспечивали бы максимальную величину  $B$  при минимальной  $m_{БЧ}$  и заданном  $V_{БЧ}$ . Полученное при этих рациональных параметрах значение  $m_{БЧ}$  далее используется при баллистическом проектировании УР БТЗ и уточнении ее технического облика.

Для нахождения этих параметров в настоящей работе использовалась следующая методика. По результатам численных экспериментов построена целевая функция бронепробития

$B = f(\delta, 2\alpha)$ . Для каждого из трех возможных типов струеформирования — «высокоградиентная струя», «низкоградиентная струя» и «ударное ядро» — найдена точка локального максимума целевой функции. Далее проведен выбор между вариантами с наибольшим  $B$  для каждого типа струеформирования по критерию минимума  $m_{БЧ}$ . При назначении итогового варианта БЧ, однако, необходимо учитывать специфику УР БТЗ, заключающуюся в расположении ГСН перед БЧ. Поэтому завершающим этапом методики являлась оценка влияния ГСН на бронепробитие и массу БЧ.

Объектом исследования являлась кумулятивная БЧ УР БТЗ (рис. 1) калибром (далее — клб)  $d_{БЧ} = d_m$  и длиной  $l_{БЧ} = 1,75d_m$ , где  $d_m$  — диаметр мишени ракеты. Предметом исследования являлись габаритно-массовые характеристики элементов кумулятивной БЧ (облицовки, заряда взрывчатого вещества), обеспечивающие максимальное бронепробитие при заданном объеме БЧ для трех типов струеформирования.

Численные эксперименты в обеспечение построения целевой функции поставлены в программном комплексе LS-DYNA, ранее хорошо зарекомендовавшем себя в качестве инструмента инженерных изысканий в области кумуляции [1].

В математической модели кумулятивного заряда, реализуемой в LS-DYNA, продукты детонации взрывчатого вещества (ВВ) описывались известным калорическим уравнением состояния Джонсона — Уилкинса — Ли (JWL) [2]. Воздушная среда, разделяющая кумулятивный заряд

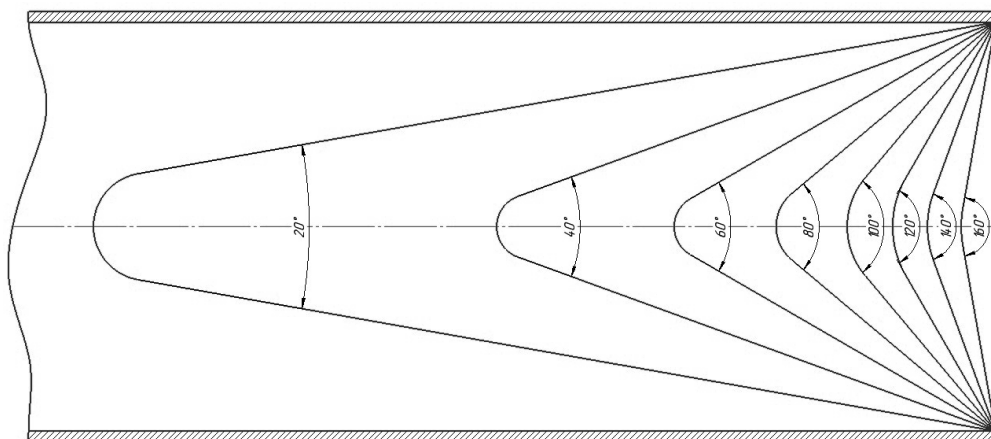


Рис. 1. Схема боевой части УР БТЗ. Показаны варьируемые углы раствора кумулятивной облицовки, исследованные в настоящей работе

и преграду, описывалась линейным полиномиальным уравнением вида

$$p = C_0 + C_1\mu + C_2\mu^2 + C_3\mu^3 + (C_4 + C_5\mu + C_6\mu^2)E,$$

где  $p$  — давление, Па;

$C_0, C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, C_6$  — константы;

$$\mu = \frac{1}{V} - 1;$$

$V$  — объем, м<sup>3</sup>.

Так как воздух рассматривался как идеальный газ, то константы задавались следующим образом [3]:

$$C_0 = C_1 = C_2 = C_3 = C_6 = 0;$$

$$C_4 = C_5 = \gamma - 1 = 0,4;$$

$$p = (\gamma - 1) \frac{\rho}{\rho_0} E; \quad V_0 = \frac{\rho}{\rho_0} = 1; \quad E = \frac{p}{\gamma - 1},$$

где  $\gamma$  — показатель адиабаты;

$V_0$  — начальный объем, м<sup>3</sup>;

$\rho_0$  — начальная плотность, кг/м<sup>3</sup>;

$\rho$  — плотность, кг/м<sup>3</sup>;

$E$  — внутренняя энергия, Дж.

Для описания поведения кумулятивной облицовки и преграды использовалась модель упругопластического деформирования при кинематическом и изотропном упрочнении. Скорость деформации рассчитывалась с использованием модели Купера и Саймондса [4], которая масштабирует предел текучести коэффициентом

$$1 + \left( \frac{\dot{\epsilon}}{C} \right)^{\frac{1}{p}},$$

где  $\dot{\epsilon}$  — скорость деформации.

Принятая в настоящей работе зависимость «напряжение — деформация» приведена на рис. 2, где  $l_0$  и  $l$  — недеформированные и деформированные длины образца при одноосном растяжении;  $E_t$  — наклон билинейной кривой «напряжение — деформация».

Приняты следующие допущения:

- задача осесимметрична;
- точка инициирования лежит на оси кумулятивного заряда;
- материалы однородны;
- корпус рассматривался как пластичный материал (отсутствует его дробление);
- кумулятивная облицовка имела постоянную толщину;
- в заряде отсутствовали узлы управления детонационным фронтом.

В настоящей работе варьировались толщина кумулятивной облицовки  $\delta$  и угол раствора  $2\alpha$  облицовки.  $2\alpha$  варьируется от 20 до 160° шагом 20° (рис. 1). Согласно [1], толщина медных и стальных облицовок лежит в пределах  $(0,02 \dots 0,04)d_{\text{БЧ}}$ . В настоящей работе этот диапазон расширен до  $(0,01 \dots 0,07)d_{\text{БЧ}}$ . Предполагалось, что кумулятивный заряд находится на фокусном расстоянии от преграды. Для каждого варианта заряда оно оценивалось исходя из вида кумулятивной струи (КС) при расчете: струя в момент касания бронепластины должна начать отделяться от песта (рис. 3).

В качестве материала для корпуса выбрана конструкционная легированная сталь 12Х2НВФА, для кумулятивной облицовки — медь, и в качестве ВВ выбран ТКХ-50 [5, 6]. Благодаря своим свойствам, ТКХ-50 перспективен для будущего применения в качестве вторичного взрывчатого

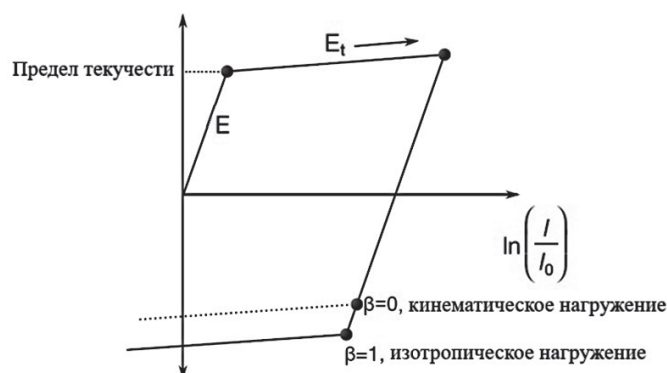


Рис. 2. Зависимость «напряжение — деформация», принятая в модели упругопластического деформирования при кинематическом и изотропном упрочнении



Рис. 3. К определению фокусного расстояния при математическом моделировании кумулятивного заряда произвольной конфигурации в LS-DYNA



Рис. 4. К определению величины бронепробития при математическом моделировании кумулятивного заряда произвольной конфигурации в LS-DYNA

вещества в современных системах вооружения. Обладает высокой термической стабильностью, плотностью и скоростью детонации. Кроме того, он изготавливается с помощью простого и недорогого синтеза и обладает низкой токсичностью, что делает его особенно привлекательным в качестве высокоэффективного взрывчатого вещества с повышенной эксплуатационной безопасностью. В качестве материала преграды выбрана сталь, соответствующая катаной гомогенной броне (RHA [7]).

Величина бронепробития определялась по глубине каверны, проделанной в преграде кумулятивной струей после ее полной остановки (рис. 4).

На рис. 5 приведены графики целевой функции  $B = f(\delta, 2\alpha)$  для БЧ, формирующей высокоградиентную струю, на рис. 6 — формирующей низкоградиентную струю и БЧ, на рис. 7 — формирующей «ударное ядро». Для удобства представления целевая функция построена в виде ряда непрерывных зависимостей от  $2\alpha$ , взятых при нескольких значениях  $\delta$ .

Перед тем как выбрать рациональный вариант БЧ по критерию минимума массы из трех вариантов, показавших максимум бронепробития для каждого типа струеобразования, отметим особенности взаимодействия каждого из трех типов кумулятивных струй с преградой.

Максимальное бронепробитие в  $6,85d_{\text{БЧ}}$  достигается при толщине облицовки  $0,0225d_{\text{БЧ}}$  и угле раствора  $40^\circ$  (рис. 5). Этот экстремум объясняется тем, что при определенной массе облицовки достигается скорость (рис. 8, а), при которой кинетическая энергия струи максимальна.

Перспективным является применение облицовок, формирующих малоградиентные струи (рис. 8, б). Это позволит поражать бронетели на расстоянии до 15 метров от точки подрыва, а также увеличить заброневое воздействие за счет большей массы струи. Рациональным вариантом будет использование облицовки толщиной  $0,025d_{\text{БЧ}}$  и углом раствора  $100^\circ$ , бронепробитие составит  $4,9d_{\text{БЧ}}$ . Недостатком стержнеформирующих кумулятивных оболочек является

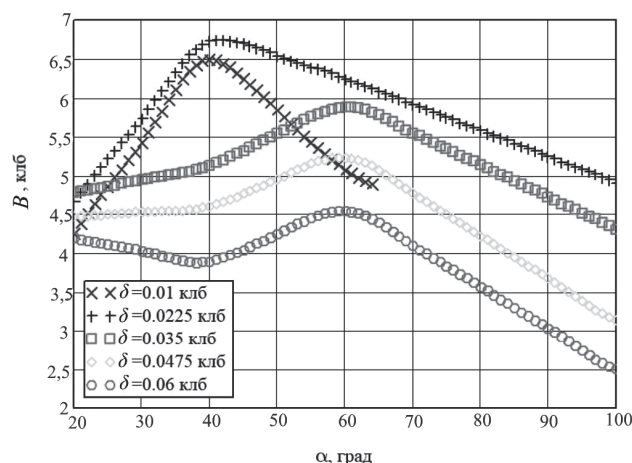


Рис. 5. График целевой функции бронепробития для БЧ с высокоградиентной струей по результатам численных экспериментов

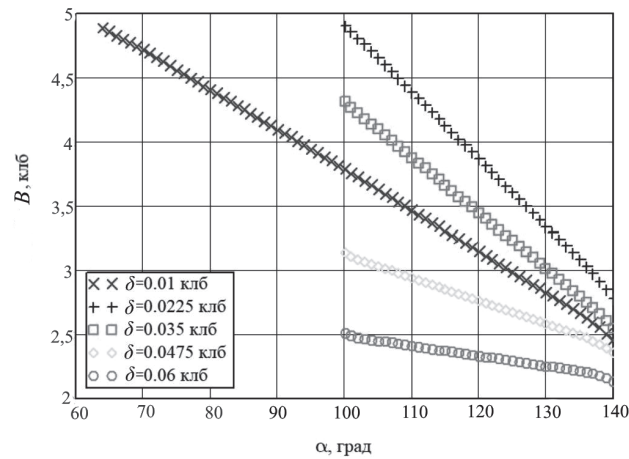


Рис. 6. График целевой функции бронепробития для БЧ с низкоградиентной струей по результатам численных экспериментов

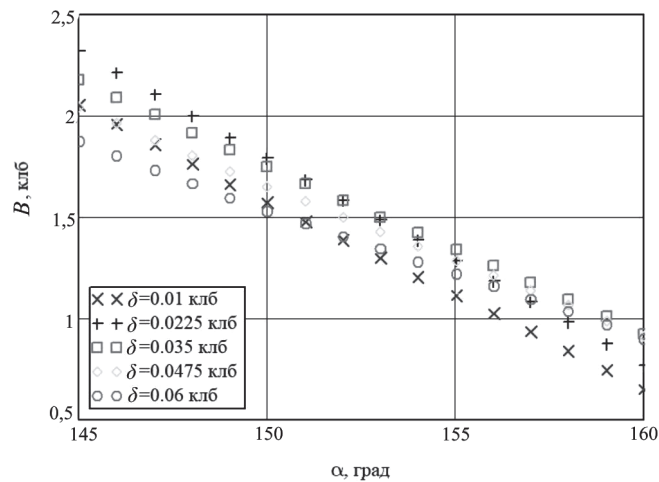


Рис. 7. График целевой функции бронепробития для БЧ, формирующей «ударное ядро», по результатам численных экспериментов

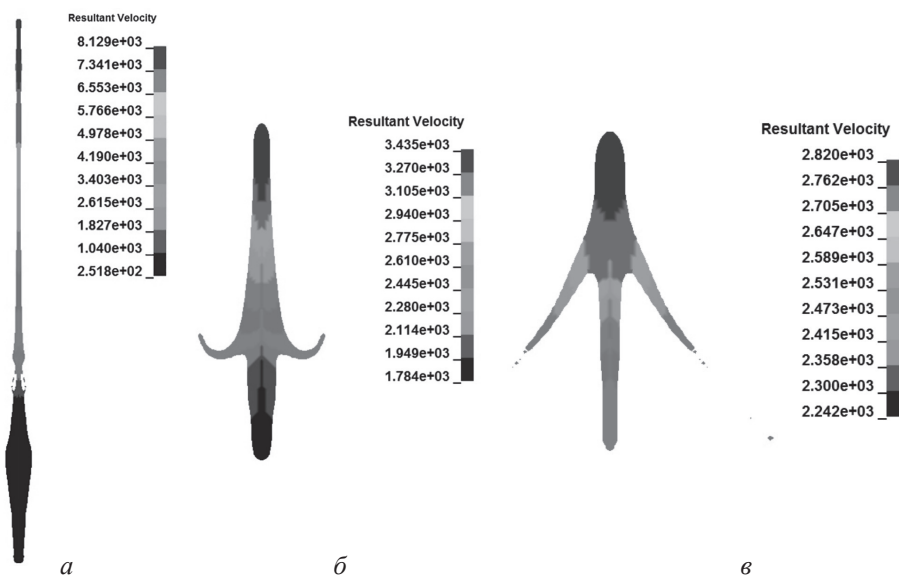


Рис. 8. Вид КС для трех типов струеформирования в LS-DYNA. Струи окрашены по значению скорости



Таблица

**Характеристики боевых частей, максимизирующих бронепробитие для трех типов струеформирования**

| Тип формы КС         | $2\alpha, ^\circ$ | $\delta$ , клб | $m_k$ , кг | $m_{\text{шм}}$ , кг | $m_{\text{ко}}$ , кг | $m_{\text{БВ}}$ , кг | $m_{\text{БЧ}}$ , кг | $B$ , клб |
|----------------------|-------------------|----------------|------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|-----------|
| Высокоградиентная КС | 40                | 0,0225         | 7,95       | 0,9                  | 2,49                 | 13,73                | 25,07                | 6,85      |
| Низкоградиентная КС  | 100               | 0,025          | 7,95       | 0,9                  | 1,16                 | 15,79                | 25,80                | 4,9       |
| Ударное ядро         | 160               | 0,04           | 7,95       | 0,9                  | 1,61                 | 16,2                 | 26,66                | 0,95      |

сложность их профилирования, а также повышенные требования к точности изготовления.

Достоинством «ударного ядра» (рис. 8, в) является возможность поражать цели на расстоянии до 30 метров от точки подрыва. «Ударное ядро» начинает формироваться при угле раствора облицовки  $145^\circ$ , этому же углу соответствует максимальное бронепробитие  $2,325d_{\text{БЧ}}$  при толщине облицовки  $0,0225d_{\text{БЧ}}$ . Необходимо отметить, что, согласно [1], максимально долго удерживают форму в полете «ударные ядра», сформированные с помощью кумулятивной облицовки с углом раствора более  $160^\circ$ . В таком случае максимальное бронепробитие  $0,95d_{\text{БЧ}}$  достигается при толщине облицовки  $0,04d_{\text{БЧ}}$ .

В таблице представлены массовые характеристики БЧ с тремя типами струеформирования, имеющих максимум бронепробития. В таблице используются следующие обозначения:  $m_k$  — масса корпуса БЧ;  $m_{\text{шм}}$  — масса предохранительно-исполнительного механизма;  $m_{\text{ко}}$  — масса кумулятивной облицовки;  $m_{\text{БВ}}$  — масса БВ.

Из представленного следует, что БЧ, формирующая высокоградиентную КС, является рациональной как по критерию максимума бронепробития, так и по критерию минимума массы БЧ. Однако у такой БЧ есть один недостаток — она способна реализовывать заданное бронепробитие лишь на коротком расстоянии от преграды. В условиях оснащения современных бронированных машин комплексами активной защиты это означает, что УР может быть перехвачена до того, как сработает БЧ. С другой стороны, два других варианта БЧ являются снарядоформирующими и способны осуществить поражение цели без захода в зону действия таких комплексов. Тем не менее их уменьшенное бронепробитие (на 29...86 % относительно максимального) означает, что поражение цели должно осуществляться со строго определенного ракурса [8]. Это накладывает ряд ограничений на траекторию полета УР к цели. Окончательное решение

о выборе того или иного варианта БЧ из представленных в таблице должно приниматься на основе оценки эффективности УР БТЗ с учетом противодействия и возможностей реализации заданных траекторий системой управления.

Другим достоинством снарядоформирующих БЧ является возможность их размещения несоосно относительно ракеты. Эта мера позволяет убрать с пути КС препятствие в виде ГСН, наличие которой на УР БТЗ обязательно. При использовании же БЧ с высокоградиентной КС неизбежны потери кинетической энергии струи на разрушение ГСН. В настоящей работе для варианта с высокоградиентной КС был поставлен численный эксперимент в LS-DYNA с целью оценки бронепробития с учетом ГСН. Структура расчетной модели ГСН приведена на рис. 9.

Численный эксперимент показал, что при учете ГСН бронепробитие БЧ с высокоградиентной КС падает на 19%, до уровня ниже, чем приведенная толщина брони наиболее защищенных проекций современных танков [9, 10]. Для «возвращения» его на прежний уровень необходимо оснастить БЧ лидирующим кумулятивным зарядом, который будет отвечать непосредственно за разрушение ГСН и нейтрализацию динамической защиты. Эта конструктивная мера повысит общую массу БЧ, и при массе лидирующего заряда свыше 0,73 кг этот тип струеформирования уже не будет являться рациональным по критерию минимума массы БЧ. Согласно предварительным оценкам, потребная масса лидирующего заряда составляет не менее 0,8 кг. Кроме того, при этом невозможно построение УР по модульному принципу, так как БЧ не является моноблочной.

В результате проделанной работы показано, что «традиционная» БЧ, формирующая высокоградиентную КС, является рациональным вариантом лишь при оценке ее бронепробития и массы «в отрыве» от специфики функционирования УР БТЗ. Проведенные исследования

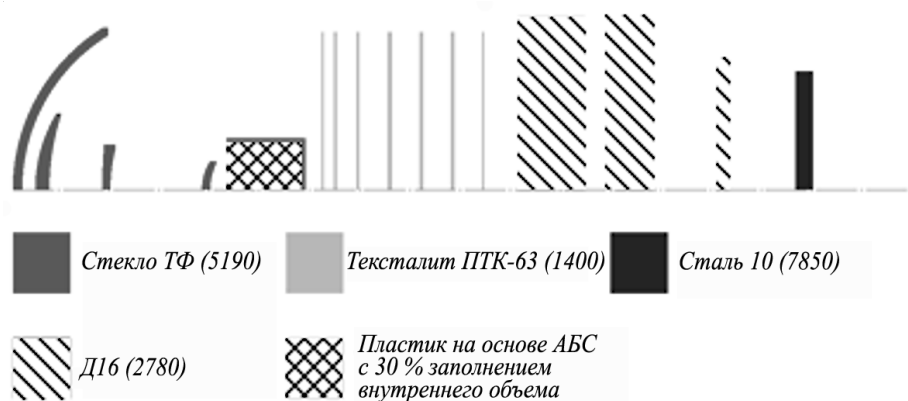


Рис. 9. Прочностная модель ГСН для расчета в LS-DYNA

показали, что для устранения потерь броепро-  
бития при разрушении ГСН необходим лиди-  
рующий заряд, утяжеляющий БЧ, а фокусное  
расстояние такой БЧ означает неизбежное по-  
падание УР в зону действия комплексов ак-  
тивной защиты. Сохранение ориентации на  
блочную-модульную компоновку и поражение  
танков с динамической и активной защитой  
требует перехода к снарядоформирующим ку-  
мулятивным БЧ, в частности с так называемой  
низкоградиентной струей.

#### Список источников

1. Воеводка А., Витковски Т. Моделиро-  
вание формирования струи в линейных куму-  
лятивных зарядах // Физика горения и взрыва.  
2014. Т. 50, № 3. С. 130–136.
2. Валько В.В., Образ О.П., Гасилов В.А.,  
Соловьева В.С., Савенко Н.О. Уравнения со-  
стояния продуктов детонации взрывчатых ве-  
ществ // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша.  
2021. № 51. 38 с.
3. Hallquist, John O. LS- DYNA theory manual /  
John O. Hallquist. Livermore: LSTC, 2014. 811 p.

4. Cowper G., Symonds P. Strain hardening and  
strain-rate effects in the impact loading of cantilever  
beams. Providence: Brown University Division of  
Applied Mathematics, 1957. 46 p.
5. Klapötke T.M., Cudziło S., Trzciński W.A.  
An answer to the question about the energetic  
performance of TKX-50 // Propellants, Explosives,  
Pyrotechnics. 2022. Vol. 47/ No 6. 9 p.
6. Fischer N., Fischer D., Klapötke T.M.  
et al. Pushing the limits of energetic ma-  
terials — the synthesis and characterization of  
dihydroxylammonium 5,5'-bistetrazole-1,1'-dio-  
late // Journal of Materials Chemistry. 2012. Vol. 22.  
No 38. Pp. 20418–20422.
7. MODUK — DEF STAN 95-24, 2020. 30 p.
8. Rasheed M.F., Wu C., Raza A. Effect  
of Explosive Reactive Armour Cover Plate on  
Interaction of ERA and Explosively Formed  
Projectile // Shock and Vibration. 2019. 10 p.
9. Leopard-2 A0-A4 armor protection esti-  
mation. URL: [http://www.bvt.narod.ru/raznoe/leo-  
pard2/Leo2a4.htm](http://www.bvt.narod.ru/raznoe/leo-<br/>pard2/Leo2a4.htm) (дата обращения 19.04.2023).
10. «Леопард-2» (A1-A). URL: [http://  
www.bvt.narod.ru/4/12.htm](http://<br/>www.bvt.narod.ru/4/12.htm) (дата обращения:  
19.04.2023).