

**ПРОБЛЕМЫ ЯДЕРНОЙ, РАДИАЦИОННОЙ
И ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ**

УДК 623.45:629.78:662.22

**ОЦЕНКА ПОСЛЕДСТВИЙ ВОЗДЕЙСТВИЯ КИНЕТИЧЕСКИХ
УДАРНИКОВ НА ВЗРЫВООПАСНЫЙ ОБЪЕКТ С
МАЛОГАБАРИТНОЙ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ
УСТАНОВКОЙ**

© 2019 О.А. Губеладзе, А.Р. Губеладзе

Донской государственный технический университет (ДГТУ), Ростов-на-Дону, Ростовская обл., Россия

Сохранение сплошности элементов корпуса ракетного твердотопливного двигателя (РДТТ) и элементов конструкции промежуточных отсеков, метаемых продуктами детонации, маловероятно. Рассматривается поражающее воздействие элементов конструкции РДТТ, метаемых продуктами детонации зарядов различной формы. Проведена оценка величины давления во фронте ударной волны, возникающей в наружном слое установки при ударе осколков оболочки заряда.

Ключевые слова: твердое ракетное топливо, ударно-волновое инициирование, детонация, ядерный боеприпас, аварийный взрыв.

Поступила в редакцию 26.10.2018

После доработки 10.06.2019

Принята к публикации 21.06.2019

На настоящий момент существуют страны, не являющиеся членами так называемого «Ядерного клуба», которые создали свой ядерный потенциал или находятся на пороге его создания (Израиль, Индия, Пакистан, Южная Корея, КНДР, Иран и другие). Более двадцати стран обладают ракетным оружием способным нести ядерные заряды [1]. Значительная доля мобильных пусковых установок наземного базирования этих стран оснащена баллистическими ракетами (рис. 1) с твердотопливными ракетными двигателями (РДТТ).

Международная обстановка в XXI веке была и будет сопряжена с вооруженными конфликтами различного характера. Например, Индия и Пакистан последовательно наращивают ядерный потенциал и развивают средства доставки ядерного оружия (ЯО). Опыт последнего вооруженного конфликта (2019 г.) свидетельствует о низком пороге перехода от приграничных столкновений к полномасштабным боевым действиям [2]. В настоящий момент, по оценкам различных экспертных центров, в арсенале Индии от 90 до 120 единиц ЯО, у Пакистана – от 35 до 70 и все это воспринимается как средство решения военных задач, которые войска не в состоянии выполнить с обычными средствами поражения, а также для захвата стратегической инициативы и устрашения [3]. Вероятность войны на Корейском полуострове сегодня также выше, чем за последние 60 лет [4]. Ситуация требует решения, причем политического и дипломатического. Конечно, американский превентивный ядерный удар по КНДР маловероятен, поскольку в Вашингтоне осознают риск спровоцировать ядерный конфликт, но при определенных условиях следует ожидать поражение пусковых установок и ракет обычными средствами стратегической и тактической авиации, а также крылатыми ракетами морского базирования в рамках проводимой операции на

театре военных действий [5]. Возможно поражение или нарушение функционирования подобных ракетных комплексов диверсионно-разведывательными формированиями [6].

Остро стоит проблема технической надежности ракетных комплексов с ядерными боеприпасами (ЯБП), находящихся в боевом составе армий выше перечисленных государств. Также в современных условиях следует ожидать дальнейшего снижения качества выполнения личным составом, эксплуатирующим ЯО и носители с ним, требований по обеспечению ядерной безопасности и предотвращению несанкционированных действий. В разгар «холодной войны» в 1985 г. на территории ФРГ (база США) произошел взрыв твердотопливного двигателя ракеты «Першинг-2» без боевого оснащения, но рядом находились подобные ракеты с ядерными боеголовками [6, 7].

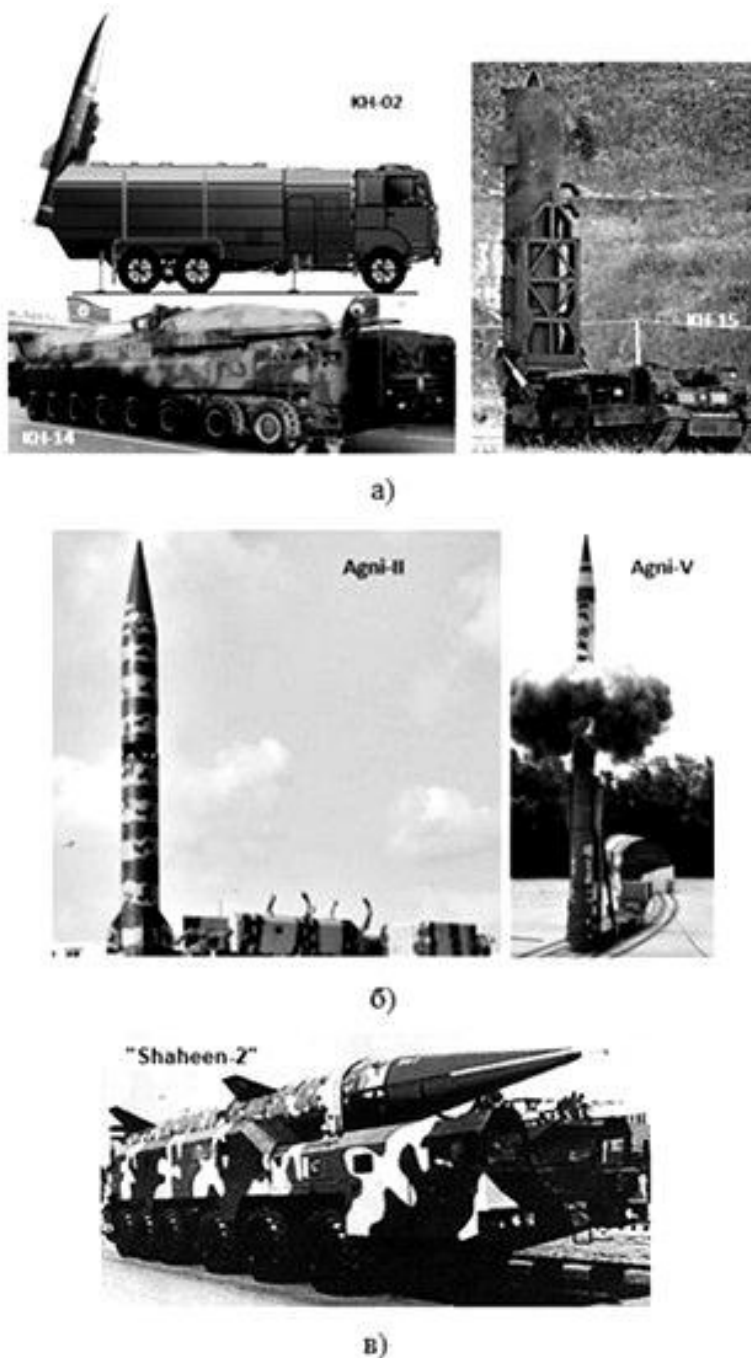


Рисунок 1 – Баллистические ракеты наземного базирования: а – КНДР; б – Индия; в – Пакистан
 [Ground-based ballistic missiles: a – DPR Korea; b – India; c – Pakistan]

В итоге следует провести моделирование возможных исходов при нерегламентированных деструктивных воздействиях для данной аварийной ситуации.

Оценка последствий для боевого оснащения ракеты воздействия кинетических ударников по заряду твердого ракетного топлива (ТРТ) может быть сведена к оценке технического состояния (ТС) ЯБП путем вычисления вероятности P_j нахождения системы в том или ином состоянии с помощью метода логико-метрического распознавания. В качестве критериев оценки ТС следует использовать критерии надежности или критерии работоспособности ЯБП. Логический этап обеспечивает исключение из классов состояния, признаки которых логически отрицаются, а метрический этап позволит рассчитать вероятность принадлежности системы к определенному классу состояния.

Анализ возможных аварийных ситуаций с твердотопливными двигательными установками ракет показал, что наиболее опасным для ЯБП, является ударное воздействие, создаваемое действием продуктов детонации и разгоняемыми элементами конструкции [5]. Рассмотрим поражающее воздействие таких элементов.

В момент воздействия ударника (осколок, пуля) по заряду ТРТ в нем (топливе) распространяется ударная волна (УВ). ТРТ за фронтом УВ находится в сжатом состоянии. Диаметр зоны сжатия определяется диаметром поверхности контакта ударника с ТРТ, глубина – толщиной осколка, интенсивность сжатия – скоростью ударника, его материалом и свойствами топлива. В сжатом топливе возникают очаги химической реакции – «горячие точки». В зависимости от интенсивности и продолжительности сжатия ТРТ возбуждаются: детонация; взрывное горение; послойное горение; разрушение заряда. Необходимая для возбуждения взрывчатого превращения интенсивность сжатия зависит от общего числа «горячих точек», а, следовательно, от структуры ТРТ и размеров зоны сжатия. В таблице 1 приведены результаты расчета параметров инициирующей УВ для одного из предложенных в статье [5] образцов гипотетического ТРТ, диапазон механических, теплофизических и химических свойств которого был определен по материалам работ [9-14]. В качестве ударника принят цилиндрический осколок из АМг-6.

Таблица 1 – Результаты расчета [Results of calculation]

Вид превращения *	d_0 , мм	u_0 , м/с	P , МН/м ²	u м/с
детонация	20	630	1370	593
	30	490	906	462
горение	20	580	1195	550
	30	430	705	406

*Здесь d_0 – диаметр ударника (осколка); u_0 – критическая скорость удара;
 P – давление во фронте УВ; u – скорость УВ

Анализ результатов показал, что с уменьшением диаметра осколка параметры УВ увеличиваются.

В реальных условиях сохранение сплошности элементов корпуса РДТТ и элементов конструкции промежуточных отсеков, метаемых продуктами детонации заряда ТРТ, маловероятно [5], в связи, с чем необходимо оценить диапазон возможных скоростей осколков (фрагментов). В работе [15] предложена математическая модель детонации заряда в корпусе, позволяющая определять скорость метания конструкции. Предварительные расчеты показали, что ожидаемые значения скоростей осколков находятся в диапазоне 950÷5600 м/с, а масса осколков составит от 0,2 до 10 кг.

Рассмотрим три варианта форм оболочек с зарядом: пластина в трубе; цилиндр; сфера (рис. 2). Выделим элементарный слой, радиус которого равен R (для пластины в

трубе – расстояние от точки инициирования до элементарного слоя), а толщина – dR . Пусть в какой-то момент времени детонация закончилась (мгновенная детонация) и начался процесс расширения продуктов взрыва. Метаемым элементам, образовавшимся при дроблении оболочки, сообщается начальная скорость v_0 . Примем допущение, что скорость расширения продуктов взрыва (ПВ), прилегающих до этого к оболочке изнутри, будет равна $v_{нс} = v_0$. Для внутренних слоев эта скорость уменьшается к центру или оси симметрии заряда до нуля.

В момент разрушения оболочки внутри расширяющихся продуктов взрыва устанавливается распределение скорости, подчиненное закону

$$v_{III} = v_0 \left(\frac{R}{R_0} \right)^n, \quad (1)$$

где $n = 1$ при линейном распределении скорости; $n = 2$ при параболическом; R_0 – радиус исходного заряда (для плоской симметрии – протяженность слоя заряда).

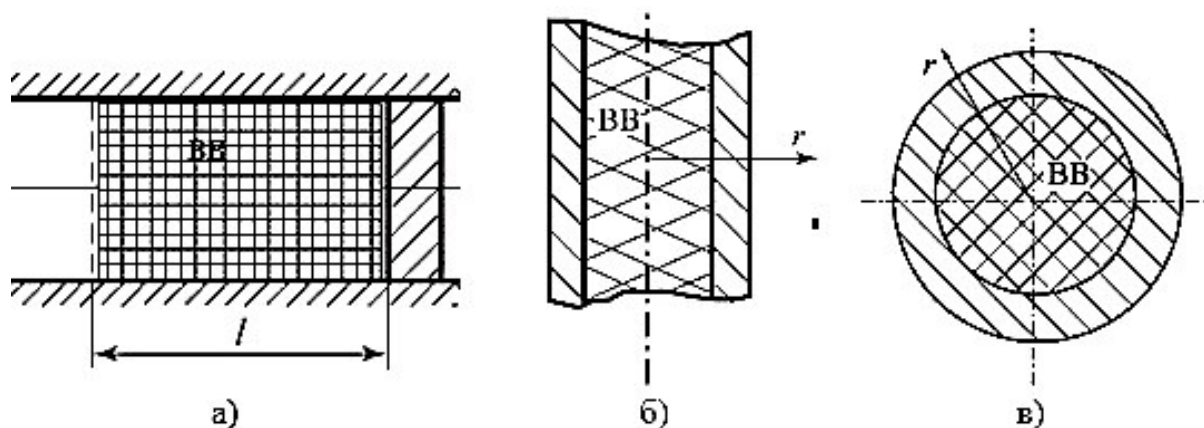


Рисунок 2 – Формы оболочек с зарядом: а – пластина в трубе; б – цилиндр; в – сфера
[Shell shapes with charge: a – plate in the pipe; b – cylinder; c – sphere]

В цилиндрическом заряде определим кинетическую энергию $dE_{нс}$ расширяющихся продуктов взрыва, заключенных в элементарном слое толщиной dR , на расстоянии R (торцевым разлетом продуктов детонации пренебрегаем)

$$dE_{нс} = \frac{v_{нс}^2 dm_{ПВ}}{2}, \quad (2)$$

где $dm_{нс}$ – масса продуктов взрыва, заключенная в рассматриваемом элементарном слое.

Для различных форм оболочки заряда (пластина в трубе, цилиндр, сфера):

$$\begin{aligned} dm_{ПВ} &= \rho_{ПВ} dR; \\ dm_{ПВ} &= 2\pi R \rho_{ПВ} dR; \\ dm_{ПВ} &= 4\pi R^2 \rho_{ПВ} dR, \end{aligned} \quad (3)$$

где $\rho_{нс}$ – плотность продуктов взрыва.пл

Для цилиндрического заряда единичной длины с учетом (1) и (3), принимая $\rho_{ne} = \rho_{ee}$

$$dE_{ПВ} = \frac{\pi \rho_{BB} v_0^2 R^{2n+1}}{R_0^{2n}}. \quad (4)$$

Интегрируя выражение (4) и проведя преобразования, получим

$$E_{ПВ} = \frac{m_{BB}^* v_0^2}{2}, \quad (5)$$

где $m_{ee}^* = m_{ee}/(n+1)$ – масса части продуктов детонации, ускоряющих оболочку заряда; $m_{ee} = \pi R_0^2 \rho_{ee}$.

Аналогично для плоской симметрии:

$$\begin{aligned} m_{BB}^* &= m_{BB} / (2n + 1); \\ m_{BB} &= R_0 \rho_{BB}. \end{aligned} \quad (6)$$

Для сферы:

$$\begin{aligned} m_{BB}^* &= 3m_{BB} / (2n + 3); \\ m_{BB} &= \frac{4\pi R_0 \rho_{BB}}{dR}. \end{aligned} \quad (7)$$

Пренебрегая потерей энергии на дробление и деформацию оболочки заряда, запишем закон движения оболочки и продуктов взрыва

$$P_{ПВ} S_{ПВ} = \frac{(m_{об} + m_{BB}^*) v dv}{dR}, \quad (8)$$

где P_{ne} и S_{ne} – давление продуктов взрыва, ускоряющих оболочку, и площадь контакта оболочки с продуктами взрыва.

При мгновенной детонации

$$P_{ПВ} = \frac{\rho_{BB} D^2 / 2(k+1)}{(R_0/R)^{N \cdot k}}, \quad (9)$$

где k – показатель изоэнтропы продуктов детонации; D – скорость детонации; $N = 1, 2, 3$ для пластины, цилиндра и сферы соответственно.

Введем безразмерные переменные:

$$r = R/R_0; \quad \beta = m_{BB}/m_{об}; \quad U = v/D; \quad (10)$$

$$f = \frac{\rho_{BB} R_0}{2m_{BB}(k+1)}; \quad S^* = S/S_0$$

Здесь S_0 – начальная площадь контакта оболочки и продуктов взрыва.
Подставляя (9) в (8) с учетом (10), получим

$$U \frac{dU}{dr} = \frac{\beta}{1+n_1\beta} f\left(\frac{1}{r^{N-k}}\right) S^*(r), \quad (11)$$

где n_1 принимает значения: $1/(2n+1)$ – пластина; $1/(n+1)$ – цилиндр; $3/(2n+3)$ – сфера.

Интегрирование уравнения (11) дает общее выражение для определения начальной скорости элементов оболочки

$$v_0 = \mu \cdot D \sqrt{\beta(1+n_1\beta)}, \quad (12)$$

где μ – параметр заряда, зависящий от типа дробления оболочки, показателя изоэнтропы и формы заряда.

Если оболочка тонкая, то значение начальной скорости стремится к предельному. Предельное значение скорости осколков зависит от формы заряда и характера организации дробления его оболочки. При неорганизованном дроблении

$$v_{пред} = D \sqrt{8n_1}. \quad (13)$$

Расчеты показали, что начальное значение давления во фронте ударной волны, возникающей в наружном слое оболочки ЯБП при ударе фрагментов конструкции РДТТ превышает 20 ГПа. Ожидаемый исход развития данного воздействия – аварийный неактивный взрыв (разрушение ЯБП) с возможным развитием пожара.

На основании приведенных результатов расчетов следует разработать комплекс мероприятий, выполняемых в случае неблагоприятных исходов для нашей территории при возникновении подобных инцидентов у границ РФ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Слипченко, В. И. Войны нового поколения: дистанционные бесконтактные / В. И. Слипченко. – Москва : ОЛМА-ПРЕСС Образование, 2004. – 382 с.
2. Зайцев, М. С. Сравнительный анализ военных доктрин Индии и Пакистана / М. С. Зайцев // Сравнительная политика. – 2018. – № 3. – С. 14-25.
3. Hoodbhoy P., Mian Z. Nuclear battles in South Asia. The Bulletin of the Atomic Scientists. May 4, 2016. URL : <http://thebulletin.org/nuclear-battles-south-asia9415>.
4. Hans M. Kristensen, Robert S. Norris (2018) North Korean nuclear capabilities. Bulletin of the Atomic Scientists. 2018. VOL.74. № 1. P. 41-51. URL : <https://www.tandfonline.com/loi/rbul20>
5. Губеладзе, О. А. Экспресс-оценка результатов нерегламентированных деструктивных воздействий на ядерно- и радиационноопасный объект / О. А. Губеладзе, А. Р. Губеладзе // Глобальная ядерная безопасность. – 2018. – № 4. – С. 24-30.
6. Денисов, О. В. Комплексная безопасность населения и территорий в чрезвычайных ситуациях. Проблемы и решения: монография / О. В. Денисов, О. А. Губеладзе, Б. Ч. Месхи, Ю. И. Булыгин; под общей редакцией Ю. И. Булыгина. – Ростов-на-Дону : Издательский центр ДГТУ, 2016. – 278 с.
7. Кириллов, В. М. Физические основы радиационной и ядерной безопасности / В. М. Кириллов. – Москва : РВСН, 1992. – 212 с.
8. Михайлов, В. Н. Безопасность ядерного оружия России / под ред. В.Н. Михайлова – Москва : Мин. по атомной энергии – 1998. – 148 с.
9. Жарков, А. С. Состояние, перспективы и проблемы утилизации ракетных топлив / А. С. Жарков, В. И. Марьяш, С. М. Уткин // Проблемные вопросы методологии утилизации смесевых ракетных топлив, отходов и остатков жидких ракетных топлив в элементах

- ракетно-космической техники: сборник трудов научно-практической конференции. Бийск : ФНПЦ «Алтай», Российская академия ракетных и артиллерийских наук, 2003. – С. 5-10.
10. Косточко, А. В. Пороха, ракетные твердые топлива и их свойства / А. В. Косточко, Б. М. Кабзан. – Москва : ИНФРА-М, 2014. – 399 с.
 11. Соколовский, М. И. Опыт экологически чистой утилизации малогабаритных РДТТ / М. И. Соколовский, В. З. Каримов, Ю. Н. Щербаков // Проблемные вопросы методологии утилизации смесевых ракетных топлив, отходов и остатков жидких ракетных топлив в элементах ракетно-космической техники: сборник трудов научно-практической конференции. Бийск : ФНПЦ «Алтай», Российская академия ракетных и артиллерийских наук, 2003. – С. 2-4.
 12. Алемасов, В. Е. Теория ракетных двигателей: учебник для студентов ВТУЗов [Текст] / В. Е. Алемасов, А. Ф. Дрегалин, А. П. Тишин; под редакцией В. П. Глушко. – Москва : Машиностроение, 1989. – 464 с.
 13. Цуцуран, В. И. Военно-технический анализ состояния и перспективы развития ракетных топлив / В. И. Цуцуран, Н. В. Петрухин, С. А. Гусев. – Москва : МО РФ, 1999. – 332 с.
 14. Энергетические конденсированные системы. Краткий энциклопедический словарь / под редакцией Б. П. Жукова. – Москва : Янус К, 2000. – 483 с.
 15. Губеладзе, О. А. Оценка результатов нерегламентированных воздействий на взрывоопасный объект / О. А. Губеладзе // Глобальная ядерная безопасность. – 2011. – № 1. – С. 61-63.
 16. Орленко, Л. П. Физика взрыва и удара / Л. П. Орленко – Москва : ФИЗМАТЛИТ, 2008. – 304 с.

REFERENCES

- [1] Slipchenko V.I. Voyny novogo pokoleniya: distantsionnye beskontaktnye [Wars of New Generation: Remote Contactless]. Moscow. OLMA-PRESS Obrazovanie [OLMA-PRESS Education Publishing House]. 2004. 382 p. (in Russian).
- [2] Zaytsev, Mikhail S. Sravnitel'nyi analiz voennykh doktrin Indii i Pakistana [Comparative Analysis of Military Doctrines of India and Pakistan] Sravnitel'naja politika [Comparative Politics] 2018. № 3. P. 14-25 (in Russian).
- [3] Hoodbhoy P., Mian Z. Nuclear battles in South Asia. The Bulletin of the Atomic Scientists. May 4. 2016. URL: <http://thebulletin.org/nuclear-battles-south-asia9415> (in English).
- [4] Hans M. Kristensen, Robert S. Norris (2018) North Korean nuclear capabilities. Bulletin of the Atomic Scientists. 2018. VOL.74. № 1. P. 41-51. URL: <https://www.tandfonline.com/loi/rbul20> (in English).
- [5] Gubeladze O.A. Express-otsenka rezul'tatov nereglamentirovannykh destruktivnykh vozdeystviy na yaderno- i radiatsionnoopasnyy ob'ekt [Express Assessment of Results of Independent Destructive Impacts on Nuclear and Radiation-Hazardous Object] Global'naya yadernaya bezopasnost' [Global Nuclear Safety]. 2018. №4 (29). P. 24-30 (in Russian).
- [6] Kirillov V.M. Fizicheskie osnovy radiatsionnoy i yadernoy bezopasnosti [Physical Bases of Radiation and Nuclear Safety]. Moscow. RVSN. 1992. 212 p. (in Russian).
- [7] Denisov O.V., Gubeladze O.A., Meskhi B.Ch., Bulygin Yu.I. Kompleksnaya bezopasnost' naseleniya i territorij v chrezvychajnyx situatsiyax. Problemy i resheniya: monografiya [Complex Safety of the Population and Territories in Emergency Situations. Problems and Solutions.]. Rostov-on-Don. Publishing center Don State Technical University. 2016. 278 p. (in Russian).
- [8] Mikhaylov V.N. Bezopasnost' yadernogo oruzhiya Rossii [Safety of Nuclear Weapon of Russia]. Moscow. Min. po atomnoy energii [Ministry of Nuclear Energy]. 1998. 148 p. (in Russian).
- [9] Zharkov, A.S., Mar'yash V.I., Utkin S.M. Sostoyanie, perspektivy i problemy utilizatsii raketnykh topliv [State, Prospects and Problems of Utilization of Rocket Fuels]. Problemy i resheniya: sb. trudov nauchno-prakticheskoy konferentsii [Problem Questions of the Methodology of Mixed Rocket Fuel Utilization, Waste and Residues of Liquid Rocket Fuels in the Elements of Rocket and Space Technology: Collection of the scientific-practical conference]. Biysk. Russian Academy of Rocket and Artillery Sciences. Federal research and production center «Altai». 2003. P. 5-10 (in Russian).
- [10] Kostochko A.V., Kabzan B.M. Porokha, raketnye tverdye topliva i ikh svoystva [Gunpowder, Rocket Solid Fuels and their Properties]. Moscow. INFRA-M. 2014. 399 p. (in Russian).
- [11] Sokolovskiy M.I., Karimov V.Z., Shcherbakov Yu.N. Opyt ekologicheski chistoy utilizatsii malogabaritnykh RDTT [Experience of Environmentally Friendly Utilization of Small-Sized RDTT]. Problemy i resheniya: sb. trudov nauchno-prakticheskoy konferentsii [Problem Questions of the Methodology of Mixed Rocket Fuel Utilization, Waste and Residues of Liquid Rocket Fuels in the Elements of Rocket and Space Technology: Collection of the scientific-practical conference]. Biysk. Russian Academy of Rocket and Artillery Sciences. Federal research and production center «Altai». 2003. P. 5-10 (in Russian).

- prakticheskoy konferencii [Problem Questions of the Methodology of Mixed Rocket Fuel Utilization, Waste and Residues of Liquid Rocket Fuels in the Elements of Rocket and Space Technology: Collection of the scientific-practical conference]. Biysk. Russian Academy of Rocket and Artillery Sciences. Federal research and production center «Altai». 2003. P. 2-4 (in Russian).
- [12] Alemasov V.E., Dregalin A.F., Tishin A.P. Teoriya raketnykh dvigateley [Theory of Rocket Engines]. Moskva. Mashinostroenie [Moscow. Mechanical Engineering]. 1989. 464 p. (in Russian).
- [13] Tsutsuran V.I., Petrukhin N.V., Gusev S.A. Voенно-tekhnicheskiy analiz sostoyaniya i perspektivy razvitiya raketnykh topliv [Military and Technical Analysis of a State and Prospect of Development of Rocket Fuels]. Moscow. MO RF. 1999. 332 p. (in Russian).
- [14] Energeticheskie kondensirovannye sistemy. Kratkiy entsiklopedicheskiy slovar' [The Power Condensed Systems. Short Encyclopedic Dictionary]. Moscow. Yanus K. 2000. 483 p. (in Russian).
- [15] Gubeladze O.A. Otsenka rezul'tatov nereglamentirovannykh vozdeystviy na vzryvoopasnyy ob'ekt [Estimating of Unregulated Influence Results on Explosive Object]. Global'naya yadernaya bezopasnost' [Global Nuclear Safety]. 2011. №1 (1). P. 61-63 (in Russian).
- [16] Orlenko L.P. Fizika vzryva i udara [Physics of Explosion and Blow]. Moscow. FIZMATLIT [Moscow. PHIZMATLIT]. 2008. 304 p. (in Russian).

Assessment of the Influence Consequence of Kinetic Impactors at Explosive Object with Small-Scale Nuclear Power Facility

O.A. Gubeladze¹, A.R. Gubeladze²

Don State Technical University, Gagarin square 1, Rostov-on-Don, Russia, 344000

¹*ORCID iD: 0000-0001-6018-4989*

WoS Researcher ID: F-6921-201

e-mail: buba26021966@yandex.ru

²*ORCID iD: 0000-0002-6966-6391*

WoS Researcher ID: F-7215-2017

e-mail: buba26021966@yandex.ru

Abstract – The continuity preservation of the rocket solid-propellant engine body elements and the intermediate compartments construction units thrown by detonation products is unlikely. The paper considers damaging effect of the construction units of the rocket solid-propellant engine, thrown by the detonation products of different form fillers. The pressure in the shock-wave front arising in the outer plant layer upon impact by filler shell fragments is estimated.

Keywords: solid rocket fuel, shock and wave initiation, detonation, nuclear ammunition, emergency explosion.