

**ПРОБЛЕМЫ ЯДЕРНОЙ, РАДИАЦИОННОЙ
И ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ**

УДК 623.454.8:662.2

**ОЦЕНКА ГРУППОВОЙ ВЗРЫВООПАСНОСТИ БОЕПРИПАСОВ В
УСЛОВИЯХ ДЕСТРУКТИВНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ И ПУТИ ЕЕ
СНИЖЕНИЯ**

© 2021 О.А. Губеладзе, А.Р. Губеладзе

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

Размещение боеприпасов на небольшой площади создает опасность группового взрыва в результате деструктивных воздействий. Обеспечить групповую взрывобезопасность боеприпасов, увеличивая расстояние между ними, невозможно из-за ограниченного объема, в котором они размещены. Это можно обеспечить с помощью применения защитных экранов от воздействия высокоскоростных ударников. Другим направлением является поиск оптимальных схем размещения боеприпасов в хранилище, обеспечивающих минимизацию количества осколков, попадающих в боеприпасы. Также рассматривается влияние внешнего фона нейтронов при групповом хранении ядерных боеприпасов.

Ключевые слова: боеприпасы, нерегламентируемые деструктивные воздействия, групповая взрывоопасность, инициирующее воздействие, самоподдерживающаяся цепная реакция, флюенс нейтронов.

Поступила в редакцию 11.03.2021

После доработки 25.03.2021

Принята к печати 01.04.2021

Хранение боеприпасов (БП), их эксплуатация в составе систем вооружения предполагает компактное размещение БП на небольшой площади, что в свою очередь создает опасность группового взрыва в результате нерегламентированных деструктивных воздействий (НДВ) [1]. Групповая взрывоопасность (ГВО) возникает в результате передачи детонации (горения) через воздушный промежуток или упругую среду при взрыве одного из рядом расположенных БП. Критическая энергия возбуждения взрыва является характеристикой заряда бризантного взрывчатого вещества (ВВ) и определяется как минимальная энергия, необходимая для инициирования взрыва (горения) заряда в оболочке (на практике используют такие параметры, как критический диаметр и критическое давление) [2]. Воздействие поражающих элементов (ПЭ) с энергией больше критической приводит к детонации заряда ВВ, и как следствие, вызывает детонацию соседних БП. Поэтому исследование вопросов обеспечения групповой взрывобезопасности (ГВБ) является актуальным.

БП, в котором в результате воздействия инициируется взрыв, считают активным. Чтобы охарактеризовать деструктивное воздействие взрыва активного боеприпаса на размещенные в непосредственной близости аналогичные исправные БП необходимо определить характеристики деструктивных факторов (ДФ) взрыва в каждой точке окружающего пространства:

- давление во фронте продуктов детонации в ближней зоне (до 6-ти радиусов заряда);
- давление во фронте продуктов детонации в дальней зоне;
- начальная скорость осколков;
- количество образовавшихся осколков;
- плотность распределения осколков по массе и скорости;

- максимальная дальность разлета осколков;
- спад скорости (от расстояния).

Поле разрушительного действия взрыва можно условно разделить на зоны: зону действия продуктов детонации; зону совместного действия продуктов детонации и ударной волны; зону фугасного действия, где определяющим фактором является воздушная ударная волна (ВУВ). Избыточное давление во фронте ударной волны определяется по формуле (1).

$$\Delta P_{\Phi} = \left(\alpha \frac{M_{\text{Э}}^{0,33}}{r} + b \cdot \frac{M_{\text{Э}}^{0,67}}{r^2} + c \cdot \frac{M_{\text{Э}}}{r^3} \right) \cdot 10^5, \quad (1)$$

где $M_{\text{Э}}$ – эквивалентная масса ВВ, кг;

a, b, c – экспериментальные константы;

r – расстояние от центра взрыва до объекта, м.

Анализ результатов расчета избыточного давления во фронте ударной волны при инициировании зарядов БП с $M_{\text{Э}}$ 22 и 75 кг (рис. 1) показал, что безопасное расстояние для рядом расположенных боеприпасов начинается с 1,5 и 2,5 метров соответственно.

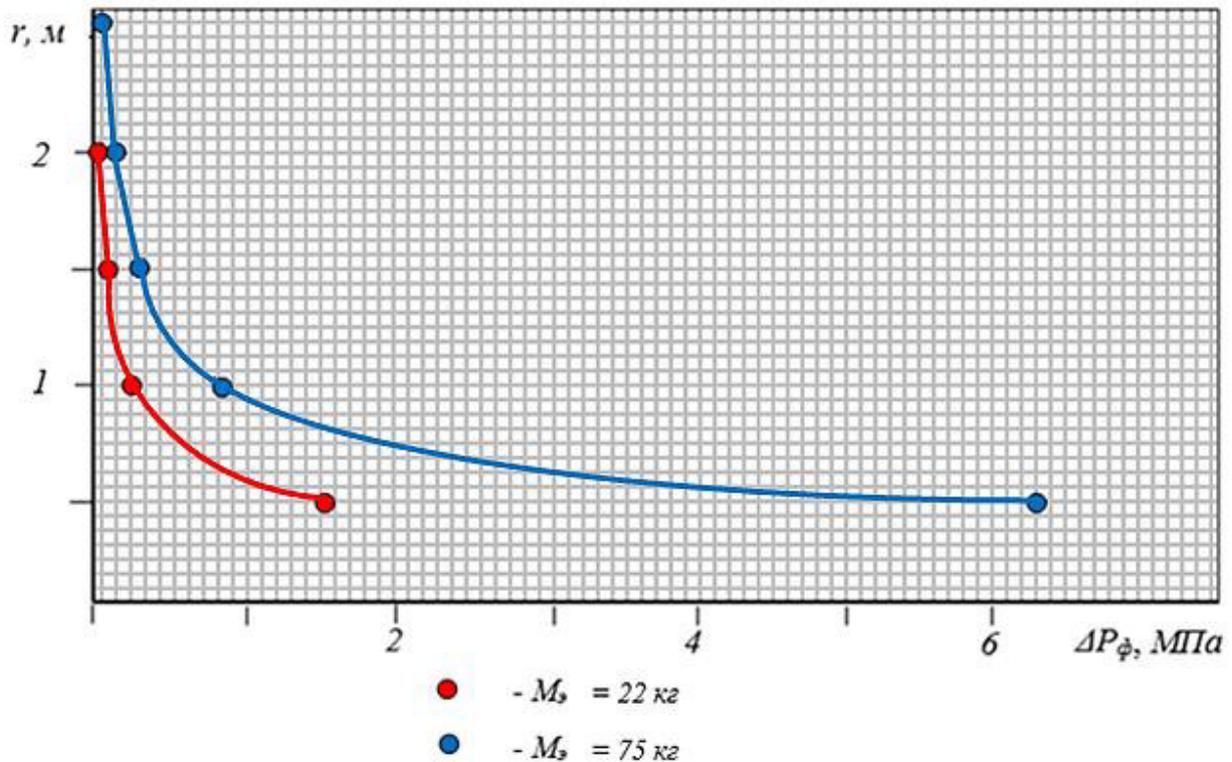


Рисунок 1 – Результаты расчета избыточного давления во фронте ударной волны при инициировании зарядов боеприпасов [Results of calculating the excess pressure in the shock wave front when initiating ammunition charges]

Активный заряд, разрушаясь, образует множество осколков различной массы и формы. Параметры осколочного поля (углы разлета и скорости) имеют широкий диапазон значений. В работе [3] рассмотрена модель для определения предельного значения скорости осколков при неорганизованном дроблении его оболочки. Установлено, что начальная скорость ударной волны существенно превышает скорость осколков, но с некоторого расстояния осколки движутся впереди ВУВ (рис. 2).

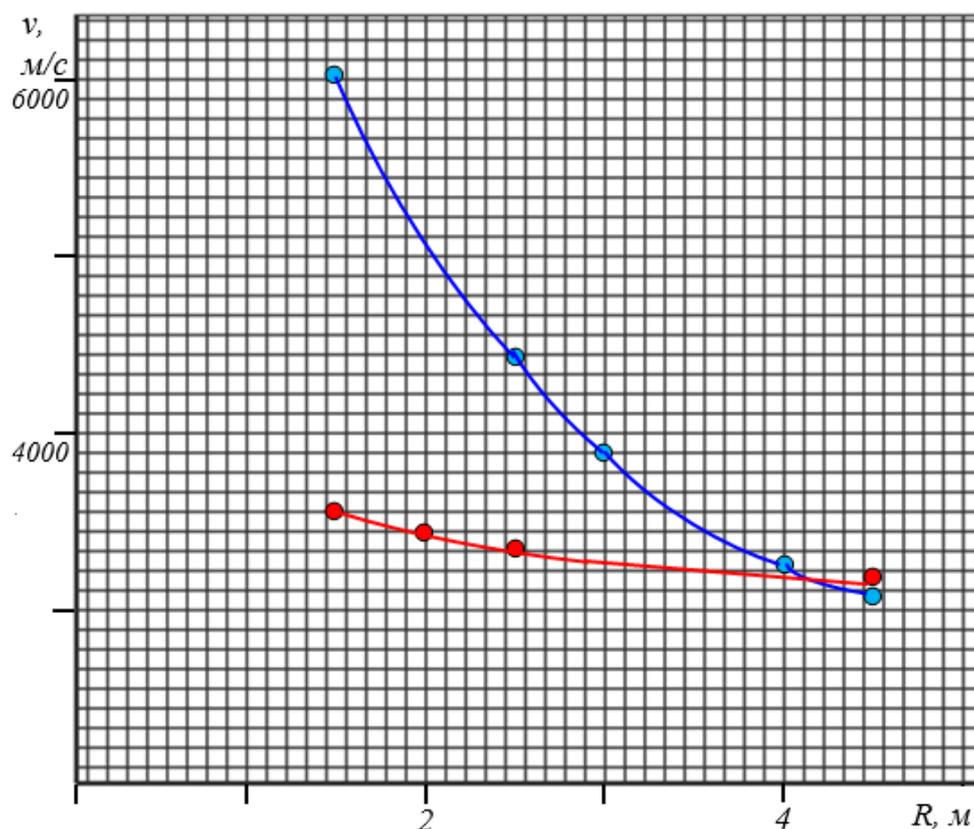


Рисунок 2 – Результаты расчета скоростей фронта ударной волны и осколков при инициировании зарядов боеприпасов [Results of calculating the velocities of the shock wave front and fragments when initiating ammunition charges]

Поражающее действие осколков в основном определяется их скоростью перед преградой, а взрывобезопасность боеприпаса будет оцениваться величиной запреградной скорости. В работе [4] представлена модель, позволяющая определять скорость перед преградой, критическую скорость пробития преграды и скорость осколка за преградой в случае ее пробития.

Критическая скорость пробития преграды может быть определена по формуле (2).

$$v_{кр} = \left[v_{nn}^2 - v_{zn}^2 \exp\left(2\chi^* \cdot \frac{m_n}{m_0}\right) \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (2)$$

где v_{nn} – скорость ударника перед преградой;

m_n – масса материала преграды, выбитого ударником;

χ^* – уточненный параметр;

m_0 – масса ударника.

Из выражения (2) определим v_{zn} . С учетом того, что при скоростях $\sim 0,3 \div 1,5$ км/с сопротивляемость проникновению ударника $f = H_d + \chi^* \rho_n v_{nn}$ (здесь H_d – динамическая твердость материала преграды и ρ_n – плотность материала преграды) получим формулу (3).

$$v_{zn} = \left[\frac{v_{nn}^2}{\exp\left(2\chi^* \frac{m_n}{m_0}\right)} - \frac{H_d}{\chi^* \rho_n} \left[\exp\left(2\chi^* \frac{m_n}{m_0}\right) - 1 \right] \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

Скорость перед преградой определяется выражением (4).

$$v_{m} = v_0 / \exp(-c_x \rho_e S l / 2m_0), \quad (4)$$

где c_x – коэффициент сопротивления ударника;

ρ_e – плотность воздуха;

S – площадь Миделя;

l – расстояние до преграды;

v_0 – начальная скорость ударника.

Анализ результатов расчета показал, что для инициирования взрывчатого превращения в заряде бризантного ВВ запреградная скорость осколка должна превысить 1,05 км/с.

Таким образом, обеспечить ГВБ боеприпасов по показателю V_{zn} , увеличивая расстояние между БП, невозможно из-за ограниченного объема, в котором они размещены. Это можно обеспечить с помощью применения защитных экранов [5]. Полученные результаты позволили принять ряд конструктивно-технических решений по пассивной защите объектов от воздействия высокоскоростных ударников [6-8].

Одним из направлений дальнейших исследований является поиск оптимальных схем размещения БП в хранилище, обеспечивающих минимизацию количества осколков, попадающих в боеприпасы.

На рисунке 3 представлена система БП (S) в хранилище.

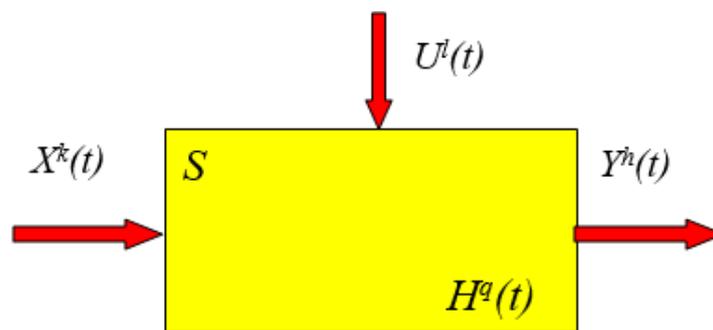


Рисунок 3 – Система боеприпасов [Ammunition system]

Исследуемый объект S представим в виде модели, которая имеет следующие характеристики: X – совокупность начальных условий и внешних воздействий; H – внутренние параметры, определяющие возможные состояния системы; Y – параметры безопасности системы; U – параметры управления риском инициирования БП. Используя оператор преобразования F_s , запишем закон функционирования системы выражением (5).

$$Y^h(t) = F_s [X^k(t), H^q(t), U^l(t)]. \quad (5)$$

Стойкость к параметрам поля взрыва рассматривается как вероятность сохранения работоспособности объекта S при внешнем воздействии. Ее оценку можно провести с помощью частных показателей: вероятности попадания ПЭ в уязвимую область; вероятности пробития корпуса БП; вероятности инициирования заряда ВВ; вероятности образования необходимых параметров поля взрыва, способных инициировать пассивные БП.

Представим систему БП как площадной объект (рис. 4). Площадь разбивается на зоны поражения ($1, 2, \dots, n$). Пусть один из боеприпасов станет активным в результате

НДВ. Осколки будут воздействовать на другие БП, находящиеся в зоне видимости, вызывая их инициирование [9]. Результаты моделирования показали, что вероятность инициирования всей группы БП без принятия дополнительных мер защиты будет стремиться к 1,0 (независимо от расположения активного боеприпаса).

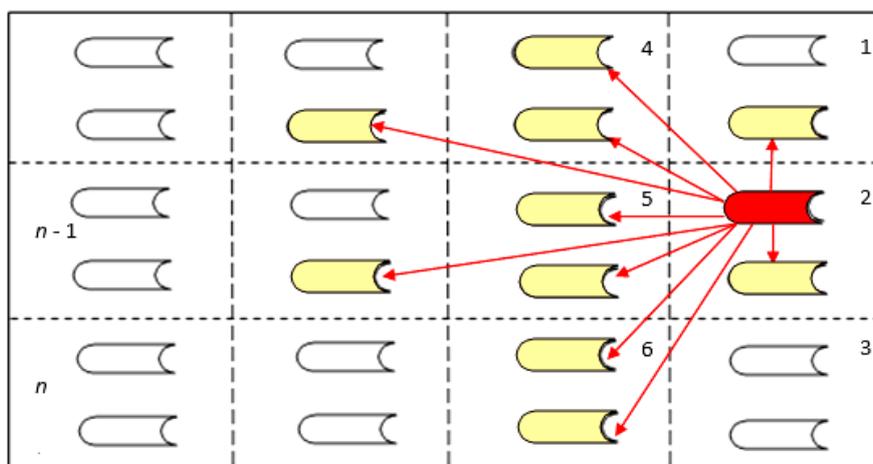


Рисунок 4 – Схема инициирования БП [Ammunition initiation scheme]

Как уже отмечалось, снижения числа последующих взрывов, вызванных иницирующим действием осколков активного боеприпаса, можно достичь путем оптимизации вариантов ориентации БП. Данная задача является многокритериальной и может быть решена с использованием метода Парето, то есть максимальная вероятность P_{max} взрыва какого-либо БП из группы при конкретном варианте их размещения и математическое ожидание $M_{\delta n}$ числа взорвавшихся БП в результате поражающего действия осколков при этом же варианте размещения должны быть минимизированы.

Расчет проводился для 28-ми вариантов схем размещения 24 БП с одинаковым количеством ВВ. Из рисунка 5 видно, что только за счет изменения осевой направленности P_{max} и $M_{\delta n}$ можно уменьшить в несколько раз.

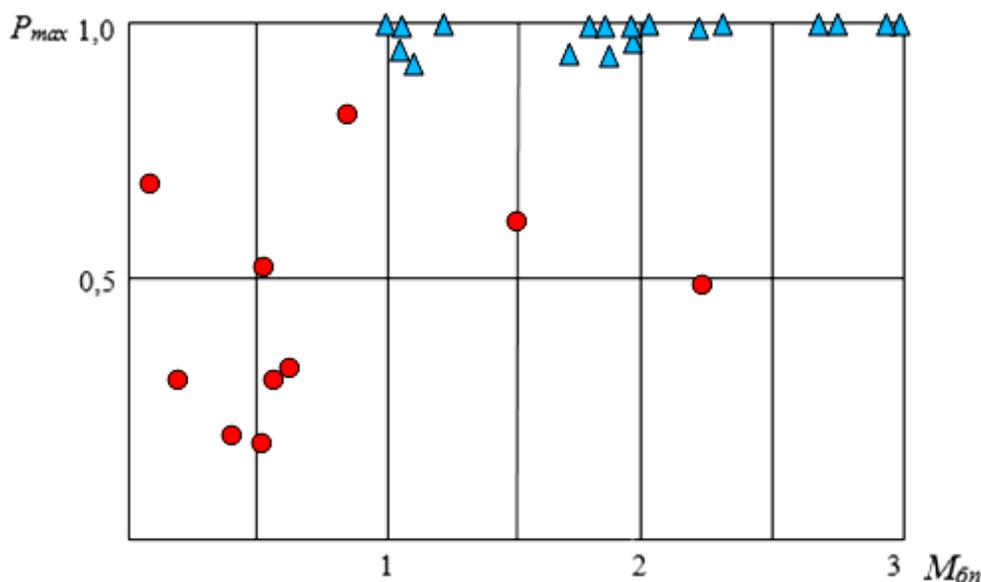


Рисунок 5 – Результаты оптимизации размещения БП [Results of ammunition placement optimization]

Задача определения взрывоопасности объекта с ядерными боеприпасами (ЯБП) с учетом возможности возникновения самоподдерживающейся цепной реакции (СЦР)

представляет большой интерес. Ее решение сводится к определению факторов, влияющих на исход аварии, их структуры и характера связей между этими факторами.

Одним из главных факторов, влияющих на кинетику СЦР, является начальный фон нейтронов и время их жизни в системе. Нейтроны возникают при делении тяжелых ядер и некоторых типах взаимодействия различных видов излучения с веществом. Они обладают большой проникающей способностью. В условиях реальной аварийной ситуации нейтронное иницирование ядерного заряда, как правило, определяется собственным нейтронным фоном делящихся материалов, входящих в состав ЯБП. Величина этого фона такова, что вероятность иницирования цепной реакции крайне мала. Однако, следует рассмотреть ситуацию, когда на заряд будет влиять внешний фон нейтронов. Реализация подобного воздействия возможна при групповом хранении ЯБП.

Большую часть жизненного цикла значительное число ядерных боеприпасов находится на хранении в специальных хранилищах. На этом этапе безопасность обеспечивается соблюдением требований общей нормативной и эксплуатационной документации. Например, запрещено хранение в одном с ЯБП помещении обычных боеприпасов, а также двухярусное хранение ядерных боеприпасов. Имеются определенные ограничения на совместное хранение различных типов ЯБП.

Для группы ЯБП следует учитывать их концентрацию $K_{ЯБП}$ на площади объекта, формула (6).

$$K_{ЯБП} = n/(LH). \quad (6)$$

Здесь L и H – длина и ширина площадки хранения, n – количество ЯБП. Тогда на вероятность иницирования СЦР будут влиять скорость генерации нейтронов, время их жизни, а также плотность распределения ЯБП на конкретной площади. В случае размещения нескольких боеприпасов в составе головной части ракеты площадь определяется радиусом платформы, на которой они установлены.

В работе [10] рассмотрена задача воздействия флюенса нейтронов на сферическую оболочку из делящихся материалов. В квазистационарном приближении на основе метода электростатической аналогии получено аналитическое решение задачи диффузии нейтронов в сферической системе координат. Зависимость может быть использована для инженерных расчетов при оценке стойкости к флюенсу нейтронов на начальных этапах анализа нейтронного разогрева и проведении размерных оценок. Ее адекватность подтверждена путем сравнения результатов расчета с результатами расчета по эмпирической зависимости и методикам, приведенным в работах [11, 12]. Удовлетворительная точность результатов даёт возможность предположить, что полученная зависимость позволяет делать расчёты по внутреннему энерговыделению в делящихся материалах при внешнем облучении флюенсом нейтронов без привлечения сложных математических моделей, что важно на начальных этапах моделирования аварийных ситуаций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ильин, В.В. Развитие теории анализа аварийной ситуации при хранении взрывчатых веществ : монография / В.В. Ильин, В.В. Козлов, И.Т. Севрюков. – Пермь : Западно-Уральский институт экономики и права, 2012. – 186 с.
2. 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 (29). – С. 24-30.
3. Губеладзе, О.А. Оценка последствий воздействия кинетических ударников на взрывоопасный объект с малогабаритной ядерной энергетической установкой /

- О.А. Губеладзе, А.Р. Губеладзе // Глобальная ядерная безопасность. – 2019. – № 3(32). – С. 33-40.
4. Губеладзе, О.А. Моделирование высокоскоростного удара / О.А. Губеладзе // Глобальная ядерная безопасность. – 2015. – № 1(14). – С. 61-69.
 5. Губеладзе, О.А. Разработка пассивной защиты подвижного агрегата с ядерно и радиационно опасным объектом / О.А. Губеладзе, А.Р. Губеладзе // Глобальная ядерная безопасность. – 2019. – № 1(30) – С. 7-15.
 6. Сахабудинов, Р.В. Научно-методические основы обеспечения физической защиты ядерноопасных объектов / Р.В. Сахабудинов, О.А. Губеладзе. – Ростов-на-Дону : ООО «Терра», 2006. – 153 с.
 7. Патент 2211434 Российская Федерация, МПК(51) F41H 5/04 (2000.01) F41H 11/08(2000.01). Защитное ограждение : заявитель и патентообладатель Краснов А.А., Ткачев В.П. – № 2002116356/02 ; заявл. 17.06.02 ; опубл. 27.08.03, бюл. № 24. – 8 с.
 8. Патент 2229675 Российская Федерация, МПК(51) F41H 5/14 (2000.01). Мобильный развертываемый защитный экран : заявитель и патентообладатель Краснов А.А., Ткачев В.П. – № 2003106026/02 ; заявл. 03.03.03 ; опубл. 27.05.04, бюл. № 15 – 13 с.
 9. Kubota N. Propellants and Explosives. Thermochemical Aspects of Combustion. – New York: John Wiley & Sons, 2015. – 560 p.
 10. Левченко, Е.М. Анализ процессов в системе подкритических сборок делящихся материалов при внешнем нейтронном облучении / Е.М. Левченко, О.А. Губеладзе, В.М. Хмура // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. – 2010. – № 5 (спецвыпуск) – С. 131-134.
 11. Критические параметры делящихся материалов и ядерная безопасность : справочник / Л.С. Диев, Б.Г. Рязанов, А.П. Мурашов [и др]. – Москва : Энергоатомиздат, 1984. – 176 с.
 12. Фролов, В.В. Ядерно-физические методы контроля делящихся веществ / В.В. Фролов. – Москва : Атомиздат, 1976. – 189 с.

REFERENCES

- [1] Ilyin V.V., Kozlov V.V., Sevryukov I.T. Razvitie teorii analiza avarijnoj situacii pri hranenii vzyryvchatyh veshchestv: monografiiy [Development of Theory of Analysis of Emergency Situation in Storage of Explosives: monograph]. Perm': Zapadno-Ural'skiy institut ekonomiki i prava [Perm: West Ural Institute of Economics and Law]. 2012. 186 p. (in Russian).
- [2] Gubeladze O.A., Gubeladze A.R. 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).
- [3] Gubeladze O.A., Gubeladze A.R. Otsenka posledstviy vozdeystviya kineticheskikh udarnikov na vzyrvoopasnyy ob'ekt s malogabaritnoj yadernoj energeticheskoy ustanovkoj [Assessment of the Influence Consequence of Kinetic Impactors at Explosive Object with Small-Scale Nuclear Power Facility]. Global'naya yadernaya bezopasnost' [Global Nuclear Safety]. 2019. №3 (32). P. 33-40 (in Russian).
- [4] Gubeladze, O.A. Modelirovanie vysokoskorostnogo udara [Modeling of High-Speed Blow]. Globalnaia iadernaia bezopasnost' [Global Nuclear Safety]. 2015. №1. P. 61-69. (in Russian).
- [5] Gubeladze O.A., Gubeladze A.R. Razrabotka passivnoj zashchity podvignogo agregata s yadernoj i radiatsionnoopasnym ob'ektom [Passive Protection Development of the Mobile Unit of Nuclear and Radiation Hazardous Objects]. Global'naya yadernaya bezopasnost' [Global Nuclear Safety]. 2019. №1(30). P. 7-15 (in Russian).
- [6] Sakhabinov R.V., Gubeladze O.A. Nauchno-metodicheskie osnovy obespecheniya fizicheskoy zashchity yadernoopasnykh ob'ektov. [Scientific and Methodical Bases of Ensuring Physical Protection of Nuclear-Dangerous Objects]. Rostov-na-Donu: ООО «Терра» [Rostov-on-Don: Limited liability company «Terra»]. 2006. 153 p. (in Russian).
- [7] Krasnov A.A., Tkachev V.P. Zashchitnoe zagragedenie [Protective boom]. Patent 2211434 Rossiyskaya Federatsiya, MPK(51) F41H 5/04 (2000.01) F41H 11/08(2000.01) [Patent 2211434 Russian Federation, IPC (51) F41H 5/04 (2000.01) F41H 11/08 (2000.01)]. № 2002116356/02; заявл. 17.06.02; опубл. 27.08.03, бул. № 24. 8 с. [No. 2002116356/02; declared 06.17.02; publ. 08.27.03, bul. No. 24. 8 p.]. 2003 (in Russian).
- [8] Krasnov A.A., Tkachev V.P. Mobilnyj razvertyvaemyj zashchitnyj ekran [Mobile Expandable Protective Screen]. Patent 2229675 Rossiyskaya Federatsiya, MPK(51) F41H 5/14 (2000.01)]. № 2003106026/02 ; заявл. 03.03.03 ; опубл. 27.05.04, бул. № 15. 13 с. [Patent

- 2229675 Russian Federation, IPC (51) F41H 5/14 (2000.01). No. 2003106026/02; declared 03.03.03; publ. 05/27/04, bul. No. 15. 13 p.]. 2004 (in Russian).
- [9] Kubota N. Propellants and Explosives. Thermochemical Aspects of Combustion. New York: John Wiley & Sons, 2015. 560 p.
- [10] Levchenko E.M., Gubeladze O.A., Khmura V.M. Analiz processov v sisteme podkriticheskikh sborok deljashchihsja materialov pri vneshnem nejtronnom obluchenii [Analysis of Processes in System of Sub-Critical Assemblies of Fissile Materials with External Neutron Irradiation]. Izvestiya vuzov. Severo-Kavkazskiy region. Tekhnicheskiye nauki. № S (spetsvypusk) [University News North-Caucasian Region. Technical science series. Application. Special Issue]. 2010. P. 131-134 (in Russian).
- [11] Diev L.S., Ryazanov B.G., Murashov A.P. [and others] Kriticheskie parametry deljashchihsja materialov i jadernaja bezopasnost [Critical Parameters of Fissile Materials and Nuclear Safety]. Moskva: Energoatomizdat [Moscow. Energoatomizdat]. 1984. 176 p. (in Russian).
- [12] Frolov V.V. Jaderno-fizicheskie metody kontrolja deljashchihsja veshchestv [Nuclear-Physical Methods of the Control of Fissile Substances]. Moskva: Atomizdat [Moscow. Atomizdat]. 1976. 189 p. (in Russian).

Assessment of Ammunition Group Explosiveness in Destructive Effects Conditions and Ways to Reduce It

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-6921-2017

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 ammunition placement in a small area creates the group explosion danger as a result of destructive effects. It is impossible to ensure the group explosive safety of ammunition, by increased distance between them, due to the limited volume in which they are placed. This can be achieved by using protective screens against the high-speed strikers impact. Another direction is the search for optimal ammunition placement schemes in storage that minimize the number of fragments falling into ammunition. The neutrons external background influence during the group storage of nuclear ammunition is also considered.

Ключевые слова: ammunition, unregulated destructive effects, group explosion hazard, initiating action, self-sustaining chain reaction, neutron fluence.