



Технологии ликвидации источников химической опасности

УДК 662.2

DOI: 10.25514/CHS.2021.1.19006

О химической безопасности выжигания гексогенсодержащих взрывчатых веществ из артиллерийских снарядов. Обзор

В. Ю. Мелешко¹✉, Г. Я. Павловец¹, А. М. Червякова¹

¹Федеральное государственное казенное военное образовательное учреждение высшего образования Военная академия Ракетных войск стратегического назначения имени Петра Великого Министерства обороны РФ, г. Балашиха, Московская обл., Россия, e-mail: vladmelva@rambler.ru

Поступила в редакцию: 17.02.2021 г., после доработки: 31.03.2021 г. принята в печать: 05.04.2021 г.

Аннотация - Проведен краткий анализ способов утилизации артиллерийских снарядов с разрывными зарядами неплавких гексогенсодержащих взрывчатых веществ (ВВ) типа А-IX-1 и А-IX-2. Представлены результаты экспериментальных и теоретических исследований по выжиганию зарядов ВВ из снарядов с гексогенсодержащим снаряжением. Предложено для обеспечения химической безопасности осуществлять выжигание ВВ с использованием технологий кипящего слоя. Рассмотрен механизм выжигания ВВ компактными струями текучего зернистого материала, в частности, песка с использованием модуля выжигания на основе аппарата с кипящим (псевдооживленным) фонтанирующим слоем.

Ключевые слова: взрывчатое вещество, выжигание, кипящий (псевдооживленный) слой, разрывной заряд, снаряд, тепловой нож.

Technologies for elimination of chemical hazards

UDC 662.2

DOI: 10.25514/CHS.2021.1.19006

About the chemical safety of burning hexogen-containing explosives from artillery shells – a review

Vladimir Yu. Meleshko¹✉, Georgiy Ya. Pavlovets¹, Anastasiya M. Chervyakova¹

¹The Military Academy of Strategic Rocket Troops after Peter the Great, Balashikha, Moscow Region, Russia, e-mail: vladmelva@rambler.ru

Received: February 17, 2021; after revision: March 31, 2021; accepted: April 5, 2021

Abstract - A brief analysis of the methods of disposal of artillery shells with explosive charges of non-fusible hexogen-containing explosives (HE) of type A-IX-1 and A-IX-2 is carried out. The results of experimental and theoretical studies on the burning of explosive charges from shells with hexogen-containing equipment are presented. It is proposed to burn explosives using fluidized bed technologies to ensure chemical safety. The mechanism of explosive combustion by compact jets of

fluid granular material, in particular, sand, using a combustion module based on an apparatus with a boiling (fluidized) fountaining bed is considered.

Key words: explosive, combustion, boiling (fluidized) bed, explosive charge, projectile, thermal knife.

ВВЕДЕНИЕ

Для утилизации артиллерийских снарядов с разрывными зарядами неплавких гексогенсодержащих взрывчатых веществ (ВВ) типа А-IX-1 и А-IX-2 может быть использовано несколько технологий. Условно их можно разделить на: технологии подрыва, извлечения зарядов ВВ из корпусов снарядов с последующей утилизацией ВВ и технологии выжигания ВВ из корпусов снарядов [1–5].

Интенсивное использование способа подрыва в период с 2010 по 2012 г. показало неприемлемость данной технологии, оказывающей крайне негативное влияние на окружающую среду и не обеспечивающей требования по ресурсосбережению [6].

Для извлечения ВВ из корпусов снарядов разработан целый ряд способов, основанных на механическом воздействии на разрывной заряд ультразвука, ударных волн, струй жидкости и др. Наибольшее распространение получили гидродинамические способы с использованием высоконапорных или кавитирующих водяных струй [7–12]. В качестве рабочей жидкости может использоваться не только вода, но и растворители, например, ацетон [13, 14].

На выходе технологического цикла получаются пустые корпуса снарядов, которые могут быть использованы повторно, и, отдельно, их взрывчатое наполнение. Наиболее актуальным является вопрос дальнейшего использования полученных вторичных ВВ. На сегодняшний день этот вопрос остается нерешенным, что обусловлено отсутствием спроса на такие материалы от потенциальных потребителей (из-за малых партий поставки, нестабильности свойств ВВ после длительного хранения, в ряде случаев опасности обращения с ними и т.д.). Накопление таких невостребованных ВВ требует дополнительных расходов на хранение, охрану и контроль состояния. Поэтому принятая практика в отношении вторичных ВВ рассматриваемого типа заключается в их сжигании.

Анализ возможных направлений использования энергетических ресурсов при сжигании вторичных ВВ [3, 5, 12] показывает ряд их существенных недостатков. Предлагаемые способы являются организационно сложными, вследствие того, что связаны с условиями, накладываемыми правилами оборота взрывчатых материалов в РФ. Эти правила предусматривают строгий учет движения этих материалов от синтеза до ликвидации.

При операциях совмещения взрывчатых материалов с твердыми коммунальными отходами (ТКО) или котельными топливами также должна гарантироваться невозможность их несанкционированного использования.

Вместе с тем, при добавлении отходов энергетических материалов в ТКО или котельные топлива увеличения энергетики полученного горючего не

происходит поскольку теплота сгорания ВВ составляет менее 10 МДж/кг, тогда как теплота сгорания ТКО, очищенных от металлов и других инертных материалов, оценивается в 12...15 МДж/кг. Сжигание металлизированных ВВ типа А-IX-2 в таких смесях приводит к повышенному содержанию оксидов азота в продуктах сгорания вследствие высокой температуры сгорания металлов, а образование большого количества конденсированной фазы, состоящей преимущественно из оксида алюминия, ведет к образованию шлаковых отложений на поверхностях котла и повышению вероятности возникновения прогаров в конструкционных элементах котлов [15, 16].

В некоторых случаях представляется целесообразным для снарядов, корпуса которых не могут быть использованы повторно, а ВВ остается неостребованным, осуществлять выжигание разрывных зарядов ВВ в корпусе снаряда. Такой подход позволяет сочетать в одном технологическом процессе операции извлечения и уничтожения зарядов ВВ, что делает технологию выжигания приоритетной по стоимостным показателям и производительности.

Данная технология на сегодняшний день является недостаточно отработанной, так как стабильное послойное горение ВВ на практике не реализуется в силу специфических свойств гексогена [17–19], что приводит к неполноте выгорания ВВ, увеличению продолжительности выжигания и обуславливает высокую вероятность детонации заряда [20].

Кроме того, технология характеризуется выбросом на площадку сжигания большого количества продуктов сгорания ВВ, в том числе, больших количеств оксида алюминия (рис. 1).



Рис. 1. Вид площадки сжигания после выжигания взрывчатого наполнения из боеприпасов
Fig. 1. View of the incineration site after burning out explosive filling from ammunition

Из краткого анализа проблемы следует необходимость разработки новых технических решений для обеспечения безопасного выжигания как зарядов ВВ из корпусов снарядов, так и сжигания вторичных ВВ, извлеченных из корпусов снарядов. Учитывая, что вопросы ликвидации вторичных ВВ достаточно подробно рассмотрены в работе [21], в настоящей статье представлен опыт разработки некоторых технических решений при выжигании разрывных зарядов ВВ из снарядов.

Способы выжигания взрывчатого наполнения из корпусов снарядов

Количество и состав основных продуктов горения ВВ в замкнутом корпусе снаряда, полученные с использованием программы термодинамического расчета «Терра» [22] при адиабатическом расширении и давлении в камере снаряда 0,3 МПа, представлены в таблице 1.

Таблица 1. Количество и состав основных продуктов горения ВВ в замкнутом объеме
Table 1. The number and composition of the main combustion products of explosives in a closed volume

Тип ВВ	Количество продуктов горения г/кг					
	СО	СО ₂	Н ₂ О	Аl ₂ О ₃ *	Н ₂	Н ₂
А-ІХ-1	398,7	99,0	124,3	-	179,6	17,7
А-ІХ-2	385,3	2,2	0,5	377,0	136,7	25,8

* С учетом окисления всех промежуточных соединений алюминия кислородом воздуха.

Наибольшую опасность для окружающей среды представляет отход оксида алюминия Аl₂О₃. Его предельно допустимые концентрации (в воздухе рабочей зоны – ПДК_{рз} и в воде – ПДК_в) в различных средах представлены в таблице 2 [23–26].

Таблица 2. Гигиенические нормативы для Аl₂О₃, образующегося при сжигания ВВ, входящего в состав отходов

Table 2. Hygienic standards for Аl₂О₃ formed during the combustion of explosives included in the waste

Вещество	ПДК _{рз} , мг/м ³	ПДК _в , мг/л	Класс опасности по воздуху	Класс опасности по воде
Алюминия триоксид (Аl ₂ О ₃)	6	0,01	4	не установлен

Эти гигиенические нормативы следует учитывать при оценке безопасности выжигания зарядов ВВ из снарядов.

Способы выжигания ВВ с использованием «теплового ножа»

Интенсификация процесса выжигания взрывчатого наполнения из корпусов снарядов, основанная на современных представлениях о механизме горения гексогена [17, 18], может быть осуществлена, например, при использовании способа «теплового ножа», обеспечивающего локальное повышение температуры поверхностного слоя горящего ВВ, повышение температуры поверхности и полноты сгорания ВВ за счет интенсификации теплопередачи от газовой фазы к поверхности горения [27].

Проведенные экспериментальные работы по выжиганию разрывных зарядов состава А-ІХ-2 показали, что использование теплового ножа, например, в виде тяжелой металлической пластины значительно ускоряет и интенсифицирует процесс, обеспечивая, в большинстве случаев, полное выгорание взрывчатого наполнения снаряда. Схема расположения элементов экспериментального устройства выжигания с тепловым ножом в виде

металлической пластины и получаемые результаты представлены на рисунке 2 и рисунке 3.

Другим вариантом реализации способа теплового ножа является использование разогретого металлического тела в форме шара с диаметром, находящимся в пределах от 0,2 до 0,7 минимального диаметра заряда выжигаемого ВВ [28].

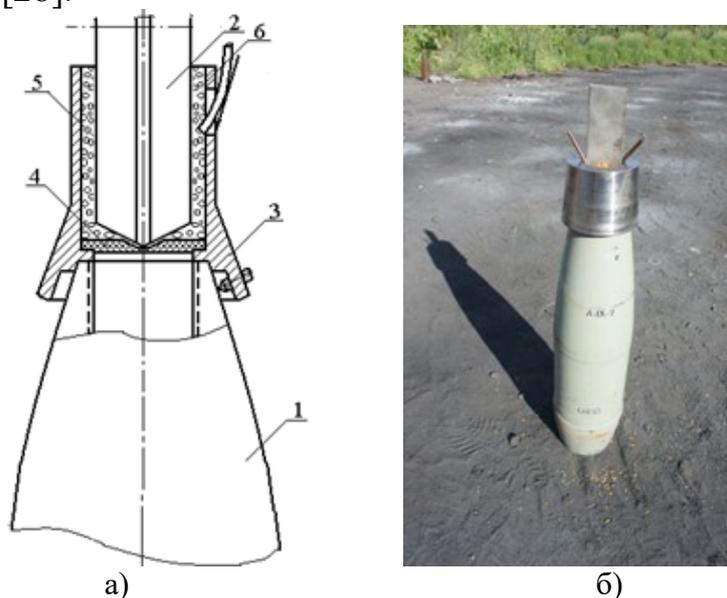


Рис. 2. Схема расположения элементов устройства выжигания с тепловым ножом: а) 1 – снаряд; 2 – тепловой нож; 3 – насадка на головную часть; 4 – сгорающая мембрана; 5 – засыпка греющего материала (пороха); 6 – огнепроводный шнур; б) внешний вид экспериментальной сборки

Fig. 2. Layout of the elements of the burning device with a thermal knife: a) 1 – projectile; 2 – heat knife; 3 – nozzle on the head; 4 – combustion membrane; 5 – filling of heating material (gunpowder); 6 – fuse cord; b) the appearance of the experimental assembly

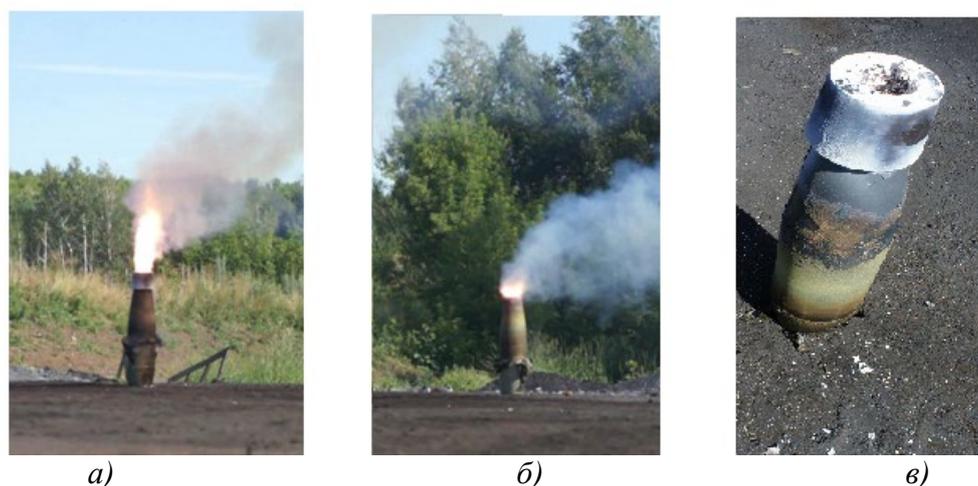


Рис. 3. Использование теплового ножа при выжигании ВВ из корпусов снарядов: а) с тепловым ножом; б) без теплового ножа; в) снаряд после выжигания

Fig. 3. Using a thermal knife when burning explosives from shells: a) with a thermal knife; b) without a heat knife; c) a projectile after burning

Как показала экспериментальная отработка данного технического решения (рис. 4), запаса тепла, сообщаемого заряду ВВ от нагретого одного

или нескольких металлических шаров, не хватает для обеспечения полного выжигания ВВ из корпуса снаряда.



Рис. 4. Сборки расснаряжаемых снарядов с лидирующими элементами в виде металлических шаров.

Fig. 4. Assemblies of demilitarized projectiles with leading elements in the form of metal balls.

Вариантом рассматриваемого способа является способ, заключающийся в выжигании заряда взрывчатого вещества из вертикально установленной металлической оболочки боеприпаса путем инициирования послойного горения взрывчатого вещества со стороны его верхней свободной поверхности воздействием на эту поверхность нагретого до высокой температуры поджигающего тела, отличающийся тем, что поджигающее тело в виде гранул выполняют из безгазового теплоинерционного теплового состава, размещенного в корпусе снаряда в контакте со свободной поверхностью, как это показано на рисунке 5а.

Состав может быть выполнен, например, на основе оксида хрома (III) и алюминия и выбран из условия обеспечения самораспространяющегося высокотемпературного синтеза. Инициирование послойного горения производится, как и в предыдущих случаях, воздействием промежуточного горючего вещества, например, пороха, которое предварительно помещают в снаряд на поверхность ВВ.

Экспериментальная отработка способа показала, что при тепловыделении в процессе горения гранул около 2 кДж/г, нескольких гранул недостаточно для полного выжигания ВВ из снаряда (рисунок 5б).



Рис. 5. Выжигание заряда ВВ при использовании гранул из безгазового теплоинерционного теплового состава.

Fig. 5. Burning out an explosive charge when using granules from a gas-free heat-inertial thermal composition.

Для устранения вышеуказанного недостатка авторами предложено устройство, подающее к горячей поверхности ВВ необходимую массу гранул, которая обеспечивает полное выжигание заряда ВВ [29], как это представлено на рисунке 6, а также улавливание и сбор оксида алюминия, и обработку газообразных продуктов сгорания ВВ.

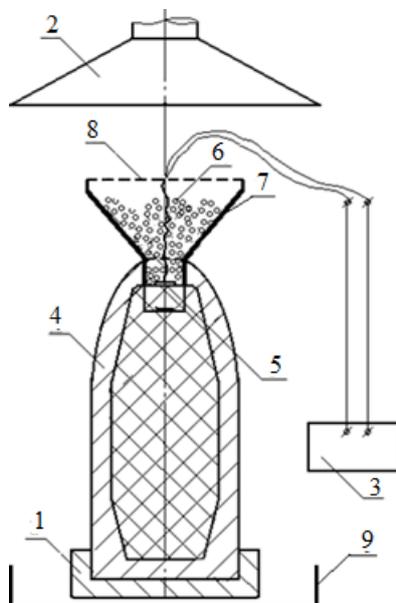


Рис. 6. Устройство для осуществления способа: 1 – стапель для закрепления снаряда; 2 – зонт вентиляционного вытяжного устройства; 3 – пульт дистанционного воспламенения; 4 – корпус снаряда; 5 – воспламенительный состав; 6 – насадка из сферических гранул; 7 – воронка; 8 – сетчатый отбойник; 9 – поддон для сбора конденсированной фазы

Fig. 6. Device for implementing the method: 1 – slipway for securing the projectile; 2 – umbrella of the ventilation exhaust device; 3 – remote ignition; 4 – shell body; 5 – igniting composition; 6 – a nozzle made of spherical granules; 7 – funnel; 8 – mesh bump stop; 9 – tray for collecting the condensed phase

В этом случае по мере увеличения свободного объема внутри снаряда происходит пополнение объема насадки внутри полости снаряда до расчетной величины за счет поступления свободно текучих гранул из воронки, закрепленной на горловине снаряда. За счет протока продуктов сгорания ВВ через образованный таким образом продуваемый насадочный слой гранулы остаются подвижными и равномерно распределяются по свободной поверхности ВВ, обеспечивая равномерное инициирование горения как за счет кондуктивной теплопроводности при контактах, так и за счет радиационной теплопередачи от излучающего тела.

Зольный остаток, остающийся в корпусе снаряда, состоит в основном из оксида алюминия от ВВ и хрома. Оксид алюминия при массовой ликвидации снарядов с алюминизированным снаряжением может быть отправлен на переработку для дальнейшего использования. Металлический хром, составляющий до 50% массы остатка теплового состава гранул, может быть извлечен из него для повторного применения обычными металлургическими технологиями.

Выжигание ВВ с использованием кипящего (псевдооживленного) слоя

Как недостаток рассмотренных выше способов выжигания ВВ из снарядов следует отметить невозможность сохранения тепловой энергии, выделяющейся при горении ВВ как вторичного ресурса. Вместе с тем, выжигание разрывных зарядов прессованных ВВ из артиллерийских снарядов может стать взрывобезопасным и энергосберегающим процессом при использовании технологий обработки материалов в кипящем (псевдооживленном) слое. Эти современные и развивающиеся технологии позволяют осуществлять интенсивное взаимодействие зернистой рабочей среды с обрабатываемым материалом, аккумулировать выделяющееся тепло в накопителях и распределять во времени расходование накопленного тепла для различных потребителей, например, электрогенераторов и тепловых сетей.

Для этих целей может быть использован модуль выжигания, схема которого представлена на рисунке 7 [29]. Он содержит цилиндроконический корпус с центральной трубой пневмотранспорта. Нижний конец трубы пневмотранспорта установлен выше основания корпуса на расстояние, определяющее перенос частиц из кольцевого псевдооживленного слоя преимущественно в конической части корпуса в трубу пневмотранспорта.

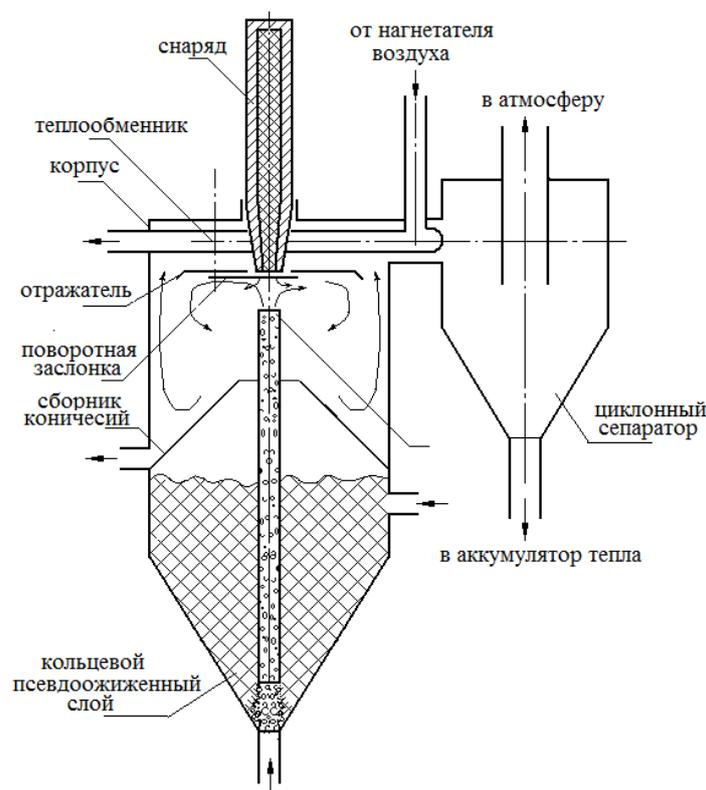


Рис. 7. Вариант схемы модуля выжигания на основе аппарата с кипящим (псевдооживленным) фонтанирующим слоем

Fig. 7. A variant of the scheme of the combustion module based on the apparatus with a boiling (fluidized) bed

Основание корпуса содержит входной участок трубы подачи нагретого несущего газа (воздуха) в трубу пневмотранспорта и в псевдооживленный слой. В качестве материала псевдооживленного слоя может быть использован текучий

зернистый материала из группы D по классификации Гелдарта (например, песок с размером частиц 1,5 – 2 мм). Верхний конец трубы пневмотранспорта устанавливается соосно с гнездом на верхней крышке корпуса модуля для снаряда, помещаемого открытой горловиной вниз. Снаряд в рабочем положении утоплен внутрь корпуса на расстояние, определяющее радиальный зазор для отвода газообразных продуктов сгорания в циклонный сепаратор. Свободный передний конец снаряда с горловиной вниз помещен в отверстие периферийного отражателя. Внутри цилиндрической части корпуса установлен конический сборник, соединенный с каналом стока текущего зернистого материала в аккумулятор тепла. В аккумулятор тепла также поступает отделенный от газа в циклонном сепараторе текучий зернистый материал. Расходуемую загрузку материала псевдооживленного слоя пополняют из бункера хранения. Корпус модуля и трубы снабжены теплоизоляцией, снижающей тепловые потери. Для обеспечения взрывобезопасности верхняя крышка корпуса модуля снабжена средствами отделения ее от корпуса в случае резкого повышения внутреннего давления.

Наименее разработанным представляется процесс ввода такого псевдооживленного потока в горловину снаряда и механизм выжигания ВВ при наличии обратного потока зернистого материала вместе с продуктами сгорания. Основываясь на результатах известных работ в этой области [30–33], авторами предположено, что механизм выжигания может быть представлен следующим образом.

Внутри вертикально установленного корпуса (рисунок 8) через открытую вниз горловину подают горячую среду из взвешенных в газе твердых частиц, температура которой выше температуры воспламенения взрывчатого снаряжения. Горловина снаряда и следующая за ней полость снаряда являются, по сути, инерционной ловушкой для твердой фазы в пылегазовом потоке или колпачковым отражателем фонтана в аппарате с фонтанирующим псевдооживленным слоем и вертикальной пневмотранспортной трубой.

Зернистый материал вызывает эрозию поверхности горения. Натекающая на поверхность горения центральная струя отражается преимущественно в радиальном направлении вдоль поверхности горения к стенкам полости и образует кольцевой нисходящий слой из твердых частиц с продуктами сгорания, который истекает кольцевым слоем из горловины. В процессе течения в кольцевом слое происходит теплообмен между более нагретыми продуктами сгорания и зернистым материалом, что приводит к снижению общей температуры, уменьшая вероятность образования оксидов азота. В горловине снаряда возникают два противоположно направленных потока, один из которых, центральный с текучим зернистым материалом, пропускают внутрь полости металлической оболочки, а другой действует в направлении выхода из полости металлической оболочки. Истекающие из полости снаряда газы тормозят газовую часть центрального потока и пропускают внутрь более инерционные твердые частицы

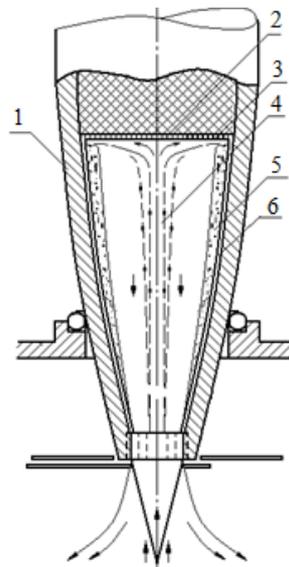


Рис. 8. Схема взаимодействия двухфазной струи с зарядом ВВ в корпусе боеприпаса: 1 – корпус снаряда; 2 – поверхность горения; 3 – взрывчатое снаряжение; 4 – центральный газовый поток с проникающими вверх к поверхности горения частицами твердой фазы; 5 – смешанный кольцевой поток с разреженной твердой фазой; 6 – пристеночный слой частиц твердой фазы.

Fig. 8. The scheme of interaction of a two-phase jet with an explosive charge in the ammunition housing: 1 – shell body; 2 – combustion surface; 3 – explosive equipment; 4 – central gas flow with solid phase particles penetrating up to the combustion surface; 5 – mixed annular flow with rarefied solid phase; 6 – wall layer of solid phase particles.

Газовая фаза тормозится в плоскости горловины и твердая фаза по инерции продолжает движение внутрь полости. В момент выхода из трубы пневмотранспорта твердые частицы обладают скоростью U_p :

$$U_p = U/\varepsilon - U_t,$$

где U – приведенная скорость газовой фазы в трубке пневмотранспорта;

ε – порозность потока в трубе;

U_t – скорость витания частиц заданной формы, массы и размера.

Величина ε для течений в режиме пневмотранспорта на выходе из трубы близка к 1. Свободное движение частиц с количеством движения $m_p U_p$ вертикально вверх тормозится силой веса частицы и аэродинамическим сопротивлением:

$$m_p U_p - (C_y \rho_g U_p^2 S/2 + m_p g)t = 0,$$

где ρ_g – плотность газа на пути частицы;

C_y – коэффициент аэродинамического сопротивления частицы;

S – максимальная площадь поперечного сечения частицы;

m_p – масса частицы;

t – время.

Воздействие нагретых твердых частиц на поверхность горения и конденсированную фазу ВВ будет вызывать ускорение горения и стабилизировать температуру газа в полости снаряда. Давлением образующихся продуктов горения твердые частицы отталкиваются от

поверхности и образуют пристеночный кольцевой слой, опускающийся по стенке полости до выхода через горловину в виде кольцевой пелены. На выходе из горловины частицы твердой фазы вместе с продуктами горения подхватываются круговым воздушным потоком, продукты неполного сгорания дожигаются кислородом воздуха, в результате чего частицы твердой фазы, прошедшие через полость снаряда, вместе с частицами твердой фазы экрана образуют общий нагретый нисходящий поток. В этом потоке происходит выравнивание температур твердой и газовой фаз и затем сепарация фаз.

Скорости горения ВВ при атмосферном давлении находятся на уровне 1 мм/с. Температура поверхности горения T_s гексогена экспериментально определена на уровне 320–312 °С, а плотность тока массы с поверхности составляет $m=0,08-0,07$ г/см²·с. При малых давлениях из-за широкой зоны горения имеет место недогорание, вследствие которого реальная температура продуктов горения существенно ниже расчетной.

Непрерывный подвод тепла к поверхности горения с текучим зернистым материалом позволяет поддерживать высокую скорость горения в течение всего периода выжигания.

При оптимизированном режиме работы выровненная конечная температура смеси составляет 800–900 °С. Нагретый до 800–900 °С текучий зернистый материал, прошедший через полость снаряда, совместно с твердой фазой, оставшейся вне полости снаряда части струи из трубы пневмотранспорта, в виде периферийного кольцевого слоя поступает в конический сборник, откуда его направляют по каналу стока в аккумулятор тепла. При завышенной конечной температуре твердой фазы повышают массовую плотность тока твердой фазы в трубе пневмотранспорта путем увеличения высоты промежутка между нижним концом пневмотранспортной трубы и основанием корпуса.

Первичное горение ВВ внутри металлической оболочки снаряда происходит при недостатке кислорода для полного сгорания. Вследствие этого температура продуктов неполного сгорания низкая и оксиды азота не образуются, за исключением тех, что возникают при разложении ВВ в незначительном количестве. Дожигание продуктов неполного сгорания с избытком воздуха происходит в присутствии большого количества балластирующего текучего зернистого материала, который снижает температуру сгорания до 800–900 °С. В этих условиях образование оксидов азота минимально. Кроме того, способ позволяет вводить в текучий зернистый материал твердотельные катализаторы разложения оксидов азота, например, на основе оксидов никеля и железа. Эффективность таких катализаторов в псевдооживленных слоях подтверждена экспериментально.

Модуль выжигания обеспечивает компактирование и последующее выделение оксида алюминия без выброса его в окружающую среду. Инертный зернистый материал может быть регенерирован и возвращен в технологический цикл. Разделение инертного зернистого материала и оксида алюминия не представляет большого труда вследствие значительных различий плотности и

размера частиц и может быть осуществлено с использованием стандартного промышленного оборудования.

Предлагаемый авторами процесс выжигания позволяет управлять удалением ВВ из снарядов путем изменения температуры и расхода твердой фазы. Дожигание продуктов неполного горения ВВ повышает экологическую чистоту процесса. Оно проводится вне полости снаряда, что исключает возможные забросы давления в полости снаряда при вскрытии возможных дефектов заряда.

Смешение продуктов с 5–8 кратным расходом инертного зернистого материала для нагрева его до 700–800 °С позволит также извлечь энергетические ресурсы ВВ для полезного использования путем накопления зернистого материала в аккумуляторе тепла и равномерного распределения во времени для парогенерации и нагрева рабочего тела тепловых сетей. Дальнейшее извлечение энергетических ресурсов может быть осуществлено по известным технологиям, например, по [34–36].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенный обзор спектра способов выжигания взрывчатого наполнения из артиллерийских снарядов не претендует на полноту охвата проблемы в целом и содержит лишь некоторую часть технических решений, направленных на решение проблемы их утилизации и апробированных авторами статьи. Тем не менее из результатов проведенных исследований можно сделать вывод о возможности осуществления ресурсосберегающей, экологически и взрывобезопасной утилизации снарядов, снаряженных неплавкими ВВ типа нитраминов, в частности, при использовании технологий кипящего (псевдоожигенного) слоя.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

CONFLICT OF INTERESTS:

The authors declare no conflict of interests.

Список литературы:

1. Мелешко В.Ю., Краснобаев Ю.Л. (2015). *Утилизация энергонасыщенных материалов: Учебник.* -М.: ВА РВСН им. Петра Великого.
2. Куренков А.В., Суханов В.М., Шевченко П.Г. и др. (2006). Под редакцией Н.И. Свертилова. *Руководство по эксплуатации ракетно-артиллерийского вооружения.* М.: ГРАУ МО РФ.
3. Давыдов Д.Ф., Рябов А.В., Федосеев В.В., Мацевич Б.В., Щукин Ю.Г. (2018). Переработка (утилизация) боеприпасов и порохов и адаптация продуктов и утилизации для промышленных целей. *Горная Промышленность.* 139(3) 76–80.
<http://dx.doi.org/10.30686/1609-9192-2018-3-139-76-78>.
4. Потапов В.П. *Отечественные инновационные технологии утилизации боеприпасов.* URL <http://federalbook.ru/files/OPK/Soderjanie/OPK-8/III/Potapov.pdf>.

5. Взрывать или не взрывать? Об утилизации боеприпасов в России.
<https://vpk.name/sources/?news&id=155> (дата обращения 15.02.2021).
6. Stefan Đurić, Bogdan Nedić, Zoran Bajić, Jovica Bogdanov, Bogdan Živković. (2020). Overview, Analysis and Research of the Possibilities of Application of New Technologies in The Process of Demilitarization of the Explosive Ordnance. *Scientific Technical Review*. 70(1), 7–16. <http://dx.doi.org/10.5937/str2001007D>.
7. Пат. 2195630 РФ, 2002.
8. Пат. 2244248 РФ, 2005.
9. Пат. 2310156 РФ, 2007.
10. Пат. 2004106841 WO, 2004.
11. Горбачев В.А., Гордюхин А.А., Мелешко В.Ю. (2014). *Теория и практика использования явления кавитации в процессах утилизации зарядов взрывчатых веществ и твердых ракетных топлив*. Монография. М.: РАРАН.
12. Тулохонов А.К., Мелешко В.Ю., Горбачев В.А., Гордюхин А.А. (2015). *Проблемы безопасности и ресурсосбережения промышленной утилизации ракет и боеприпасов*. Монография. М.: Издательство ООО «Сам полиграфист».
13. Пат. 2713817 РФ, 2018.
14. Полезная модель 98799 РФ, 2010.
15. Пат. 3916805 US, 1975.
16. Baxter L., Davis K., Sinquefield S., Huey S., Lipkin J., Shah D., Ross J., Sclipa G. Reapplication of Energetic Materials as Fuels // *International Journal of Energetic Materials and Chemical Propulsion*. Т.4, 1997, p. 167–176.
<https://dx.doi.org/10.1615/IntJEnergeticMaterialsChemProp.v4.i1-6.200>.
17. Зенин А.А., Финяков С.В. (2009) Исследование механизма горения гексогена и октогена различными экспериментальными методиками. *Физика горения и взрыва*, 45(5), 60–81.
18. Beckstead M.W. et al. (2007). Modeling of combustion and ignition of solid-propellant ingredients. *Progress in Energy and Combustion Science*. 33, 497–551.
<https://doi.org/10.1016/j.pecs.2007.02.003>
19. Mitani T. and Williams F.A. A Model for the Deflagration of Nitramines. (1986). 21-st Symposium (International) on Combustion, Department of Mechanical, Aerospace Engineering Princeton University, Princeton, NJ 08544, p.p. 1965–1974.
DOI: [https://doi.org/10.1016/S0082-0784\(88\)80433-8](https://doi.org/10.1016/S0082-0784(88)80433-8).
20. Мелешко В.Ю., Маликов Р.С., Павловец Г.Я., Кочелаевская В.С. (2017). Обеспечение безопасности выжигания взрывчатого наполнения из артиллерийских снарядов. В сб. материалов XX Всероссийской научно-практической конференции «Актуальные проблемы защиты и безопасности». Санкт Петербург: НПО СМ – РАРАН. С.121–125.
21. Павловец Г.Я, Мелешко В.Ю., И.Д.Эпинатьев, А.В.Рощин. (2017). Безопасная ликвидация взрывчатых веществ нитраминового ряда. *Химическая безопасность*. 1(2), 166–175. <https://doi.org/10.25514/CHS.2017.2.10991>
22. Трусов Б.Г. (2010). *Программа термодинамического расчета состава фаз произвольных гетерогенных систем, а также их термодинамических и транспортных свойств*. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана.
23. Гигиенический норматив 2.2.5.1313-03 «Предельно допустимые концентрации (ПДК) вредных веществ в воздухе рабочей зоны».
24. Гигиенический норматив 2.1.5.1315-03 «Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования».
25. Гигиенический норматив 2.1.7.2041-06 «Предельно-допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в почве».
26. Гигиенический норматив 2.1.6.3492-17 «Предельно допустимые концентрации (ПДК) загрязняющих веществ в атмосферном воздухе городских и сельских поселений».

27. Гусаченко Л.К. (2010). Режимы работы тепловых ножей. *Физика горения и взрыва*. 46(1), 3–13.
28. Пат. 2104471 РФ, 1998.
29. Пат. 2224215 РФ, 2004.
30. Пат. 2485437 РФ, 2013.
31. Енякин Я.Р. (1968). Глубина проникновения частиц твердой или жидкой фазы в противоположно направленных газодисперсных струях. *Инженерно-физический журнал*. 14(6), 995–1000.
32. Мейтцер В.Л. и др. (1968). Движение частиц твердой фазы в противоточных газодисперсных струях. *Инженерно-физический журнал*. 15(6), 1034–1040.
33. Буркина Р.С., Микова Е.А. (2009). Высокотемпературное зажигание реакционноспособного вещества горячей инертной частицей с конечным запасом тепла. *Физика горения и взрыва*, 2009, 45(2), 40 – 47.
34. Пат. 10329623 DE, 2005.
35. Warerkar, S., Schmitz, S., Goetsche, J., Hoffschmidt, & B., Tamme R. (2009). Air-Sand Heat Exchanger for High-Temperature Storage. ASME 2009, 3-rd International Conference on Energy Sustainability, 2.
36. Bartsch Philipp, Zunft Stefan. (2017). Heat Transfer in Moving Bed Heat Exchangers for High Temperature Thermal Energy Storage. AIP Conference Proceedings 1850(1):080004. <https://www.researchgate.net/publication/317983983>. <https://doi.org/10.1063/1.4984425>.

References:

1. Meleshko, V.Yu. & Krasnobaev, Yu.L. (2015). *Utilization of energy-rich materials: Textbook*. М.: VA Strategic Missile Forces im. Peter the Great. (in Russ.)
2. Kurenkov, A.V., Sukhanov, V.M., Shevchenko, P.G. et al. (2006). *Manual for the operation of missile and artillery weapons*. Edited by N.I. Svertilova. М.: GRAU MO RF. (in Russ.)
3. Davydov, D.F., Ryabov, A.V., Fedoseev, V.V., Matseevich, B.V., & Shchukin, Yu.G. (2018). Recycling (disposal) of ammunition and gunpowder and adaptation of products and disposal for industrial purposes. *Mining*. 139(3). 76– 80. <http://dx.doi.org/10.30686/1609-9192-2018-3-139-76-78> (in Russ.).
4. Potapov, V.P. (2012) Domestic innovative technologies for the disposal of ammunition. URL <http://federalbook.ru/files/OPK/Soderjanie/OPK-8/III/Potapov.pdf> (in Russ.).
5. To detonate or not to detonate? On the disposal of ammunition in Russia. <https://vpk.name/sources/?news&id=155> (accessed 15.02.2021) (in Russ.).
6. Stefan Đurić, Bogdan Nedić, Zoran Bajić, Jovica Bogdanov, & Bogdan Živković. (2020). Overview, Analysis and Research of the Possibilities of Application of New Technologies in The Process of Demilitarization of the Explosive Ordnance. *Scientific Technical Review*. 70(1), 7–16. <http://dx.doi.org/10.5937/str2001007D>.
7. Pat. 2195630 Russian Federation, 2002.
8. Pat. 2244248 Russian Federation, 2005.
9. Pat. 2310156 Russian Federation, 2007.
10. Pat. 2004106841 WO, 2004.
11. Gorbachev, V.A., Gordyukhin, A.A., & Meleshko, V.Yu. (2014). Theory and practice of using the phenomenon of cavitation in the processes of disposal of charges of explosives and solid rocket fuels. Monograph. М.: RARAN (in Russ.).
12. Tulokhonov, A.K., Meleshko, V.Yu., Gorbachev, V.A., Gordyukhin, A.A. (2015). Problems of safety and resource-saving of industrial disposal of missiles and ammunition. Monograph. М.: Publishing house LLC “Sam polygraphist” (in Russ.).
13. Pat. 2713817 WO, 2018.
14. Utility model 98799 Russian Federation, 2010. (in Russ.).
15. Pat. 3916805 US, 1975.

16. Baxter, L., Davis, K., Sinquefield, S., Huey, S., Lipkin, J., Shah, D., Ross, J., & Sclipa, G. (1997). Reapplication of Energetic Materials as Fuels. *International Journal of Energetic Materials and Chemical Propulsion*, 4, 167–176.
<https://dx.doi.org/10.1615/IntJEnergeticMaterialsChemProp.v4.i1-6.200>.
17. Zenin, A.A. & Finyakov, S.V. (2009) Investigation of the mechanism of combustion of RDX and HMX by various experimental methods. *Physics of combustion and explosion*, 45(5), 60–81. (in Russ.).
18. Beckstead, M.W. et al. (2007). Modeling of combustion and ignition of solid-propellant ingredients. *Progress in Energy and Combustion Science*. 33, 497–551.
<https://doi.org/10.1016/j.pecs.2007.02.003>
19. Mitani, T. & Williams, F.A. (1986). A Model for the Deflagration of Nitramines. 21-st Symposium (International) on Combustion, Department of Mechanical, Aerospace Engineering Princeton University, Princeton, NJ 08544, pp. 1965–1974. [https://doi.org/10.1016/S0082-0784\(88\)80433-8](https://doi.org/10.1016/S0082-0784(88)80433-8).
20. Meleshko, V.Yu., Malikov, R.S., Pavlovets, G.Ya., & Kochelaevskaya, V.S. (2017). Ensuring the safety of burning out explosive content from artillery shells. On Sat. materials of the XX All-Russian scientific-practical conference “Actual problems of protection and security”. St. Petersburg: NPO SM - RARAN. P.121–125. (in Russ.).
21. Pavlovets, G.Ya., Meleshko, V.Yu., Epinatiev., I.D., Roshchin, A.V. (2017). Safe disposal of nitramine explosives. *Khimicheskaya Bezopasnost' = Chemical safety Science*. 1(2), 166–175.
<https://doi.org/10.25514/CHS.2017.2.10991> (in Russ.).
22. Trusov B.G. (2010). *A program for thermodynamic calculation of the composition of phases of arbitrary heterogeneous systems, as well as their thermodynamic and transport properties*. M.: MSTU im. N.E. Bauman. (in Russ.).
23. Hygienic Standard 2.2.5.1313-03 «Maximum permissible concentration (MPC) of harmful substances in the air of the working area». (in Russ.).
24. Hygienic Standard 2.1.5.1315-03 «Maximum permissible concentration (MPC) of chemical substances in water of water bodies of domestic drinking and cultural and domestic water use». (in Russ.).
25. Hygienic Standard 2.1.7.2041-06 «Maximum permissible concentration (MPC) of chemicals in soil». (in Russ.).
26. Hygienic Standard 2.1.6.3492-17 «Maximum permissible concentration (MPC) of pollutants in the air of urban and rural settlements». (in Russ.).
27. Gusachenko, L.K. (2010). Operating modes of thermal knives. *Combustion and explosion physics*. 46(1), 3–13. (in Russ.).
28. Pat. 2104471 Russian Federation, 1998.
29. Pat. 2224215 Russian Federation, 2004.
30. Pat. 2485437 Russian Federation, 2013.
31. Enyakin, Ya. R. (1968). Penetration depth of solid or liquid particles in oppositely directed gas-dispersed jets. *Engineering Physics Journal*. 14(6), 995–1000. (in Russ.).
32. Meitzer, V.L. et al. (1968). The movement of solid phase particles in countercurrent gas-dispersed jets. *Engineering Physics Journal*. 15(6), 1034–1040.
33. Burkina R.S., & Mikova E.A. (2009). High-temperature ignition of a reactive substance by a hot inert particle with a finite supply of heat. *Combustion and Explosion Physics*. 45(2), 40–47.
34. Pat. 10329623 DE, 2005.
35. Warerkar, S., Schmitz, S., Goetsche, J., Hoffschmidt, B., & Tamme, R. (2009). Air-Sand Heat Exchanger for High-Temperature Storage. ASME 2009, 3-rd International Conference on Energy Sustainability, Vol.2.
36. Bartsch, Philipp, Zunft, & Stefan. (2017). Heat Transfer in Moving Bed Heat Exchangers for High Temperature Thermal Energy Storage. AIP Conference Proceedings 1850(1):080004.
<https://www.researchgate.net/publication/317983983>. <https://doi.org/10.1063/1.4984425>