

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ПИРОТЕХНИЧЕСКИХ СОСТАВОВ В ИМИТАЦИОННЫХ ИЗДЕЛИЯХ

И.В. Щеголькова<sup>1</sup>, Р.Г. Абдулкаримова<sup>2</sup>, И.М. Вонгай<sup>1</sup>, С.Б. Воденичаров<sup>3</sup>, Н.Т. Мақұлбек<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ТОО «Алма ДК», Туркебаева 199, Алматы, Казахстан

<sup>2</sup>Казахский Национальный Университет имени аль-Фараби, пр. аль-Фараби, 71, Алматы, Казахстан

<sup>3</sup>Институт Металлознания, оборудования и технологии с центром гидроаэродинамики имени академика А. Балеvски при БАН, София, Болгария

Дата поступления:

5 Ноября 2019

Принято на печать:

10 декабря 2019

Доступно онлайн:

26 декабря 2019

УДК: 541.128.124

### АННОТАЦИЯ

Рассмотрена возможность замены тротила в имитационных боеприпасах на пиротехнические смеси. Проведен подбор и анализ пиротехнических составов, проведены теоретические расчеты кислородного баланса и объема газообразных продуктов взрыва для каждой системы. На модельной системе рассмотрен механизм инициирования основного пиротехнического заряда. Изучена работа ТЭНового инициатора как в чистом виде, так с применением инертного наполнителя. Показано образование треков металлических частиц и их горение в атмосфере. Установлены световые и звуковые характеристики имитационных боеприпасов на подобранных пиротехнических смесях. Исследовано бризантное воздействие полученных пиротехнических изделий.

*Ключевые слова:* пиротехнические составы, детонация, тротил, тетранитропентаэритрит, капсуль – детонатор, взрывчатое вещество.

### Введение

Современные положения химической кинетики и горения, химии и технологии взрывчатых веществ и материалов справедливо разделяют процессы горения и детонации по своей природе и сущности. Помимо всего прочего, процессы детонации отличаются от процессов горения временными и скоростными характеристиками. Например, у наиболее изученного бризантного взрывчатого вещества (ВВ) 2,4,6 – тринитротолуола (тротил, ТНТ) скорость детонации составляет 4000–7000 м/с, а ширина фронта волны детонации 0,5–2 мм. Таким образом, характеристическое время детонационного превращения для ТНТ составляет  $5 \cdot 10^{-7}$  с, что близко к предельным скоростям единичного акта химической реакции  $10^{-15}$ – $10^{-9}$  с [1, 2, 3].

Вследствие таких высоких скоростей при детонации, наибольший энергетический вклад при работе взрыва создается работой расширяющихся газов, то есть происходит механическая работа. Подтверждением этого является погасание детонационной волны и разброс взрывчатых материалов, например, при использовании простейших взрывчатых смесей промышленных ВВ при ошибках проектирования зарядов. Несмотря на высокое содержание

запасенной химической энергии в промышленных ВВ (4–7 МДж/кг), при вырождении детонационной волны взрывные процессы прекращаются, и ВВ реагирует полностью.

Пиротехнические смеси и изделия имеют принципиально другой механизм реагирования, в настоящее время объясняемый кондуктометрическим эстафетным механизмом прогрева холодных слоев пиротехнического состава за счет тепла реакции горения в уже активных слоях пиротехнических смесей. Фактически речь идет о скоростях порядка 1–200 мм/с, при перепаде температур 200–500 градусов между холодными и горячими слоями составов и шириной фронта волны горения 0,1–10 мм.

Таким образом, в настоящее время существует разница по времени (4–8 порядков), и по скоростям нагружения между пиротехническими составами и взрывчатыми веществами в режиме детонации. Эта разница не позволяет напрямую трансформировать огневой импульс в детонационный и наоборот.

В промышленности существуют пиротехнические реле [4], которые в какой-то мере позволяют выполнить задачи трансформации импульсов горения и детонации, однако в инженерных боеприпасах такие механизмы не используются, хотя их применение позволило бы существенно расши-

\*Ответственный автор

E-mail: bagina\_irina@mail.ru (И.В. Щеголькова).

речь решаемые задачи боеприпасами, в том числе не имеющими в составе индивидуальных ВВ как в виде основного заряда, так и в качестве сенсibilизаторов.

Одним из примеров использования пиротехнических составов в режиме взрыва является пиротехнические составы разработанные в СССР и имитирующие выстрелы артиллерийских орудий и взрыв снарядов [5]. Наиболее значимой частью этих имитационных патронов, является тротило-нашатырная шашка, при этом тротил детонирует в штатном режиме, а нашатырь является эффективным дымообразователем. Звуковой эффект имитационного патрона является вырожденной волной детонации взрыва тротилового заряда.

Применение вместо тротилового заряда пиротехнического позволит устранить бризантный эффект, характерный при работе тротильных имитационных патронов, а также даст возможность использовать прилегающие пиротехническому заряду слои воздуха в реакции горения и взрыва с инжeктированными в атмосферу полупродуктами горения пиротехнических зарядов.

Целью настоящей работы было изучение возможности замены ТНТ на смесевые пиротехнические составы на основе нитрата и перхлората калия в имитационных пиротехнических изделиях.

Имитационные боеприпасы предназначены для создания звукового и светового эффектов выстрела различных видов вооружения, таких как Гаубица Д-30, 100-мм пушка и т.п., а также для имитации разрывов артиллерийских снарядов. В связи с этим при рассмотрении составов, и возможности их применения в имитационных боеприпасах, особое внимание следует уделить составам, имеющим максимальный пиротехнический эффект.

Во многих случаях специальный пиротехнический эффект повышается, если в процессе сгорания горючего принимает участие не только окислитель но и кислород воздуха. Это происходит потому, что для многих видов составов специальный эффект повышается с увеличением теплоты горения состава. Она при прочих равных условиях будет тем больше, чем больше в составе будет содержаться полностью сгорающего (хотя бы частично и за счет кислорода воздуха) горючего. Хороший специальный эффект от составов, содержащих в себе избыток горючего, получается обычно в тех случаях, когда горючее представляет собой легко окисляющееся вещество, способное частично сгорать за счет кислорода воздуха [6].

## Экспериментальная часть

В качестве модельных пиротехнических составов были выбраны составы на основе нитрата и перхлората калия. В качестве горючих компонентов

были использованы порошки магнезия, алюминия и их сплав между собой в отношении 50/50 (ПАМ). Для улучшения эксплуатационных характеристик (в частности пыление) при приготовлении пиротехнических композиций в их состав вводили от 0,5 масс.% до 2 масс.% растительного масла (усредненная общая формула которого  $C_{23}H_{36}O_7$ ).

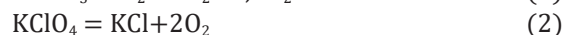
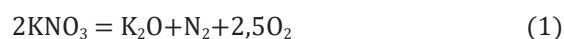
Для проведения испытаний были подготовлены образцы изделий, представляющие собой бумажные цилиндры с смонтированным зарядом и отверстием под капсюль – детонатор ЭД – 8. Масса пиротехнического состава составляет  $1000 \pm 20$  г.

Изделия подвешивали на высоту 1 м от поверхности грунта, инициирование проводилось замыканием аккумуляторной батареи (12 В) на магистраль взрыва. Регистрация испытаний проводилась на цифровую камеру Nikon D3200 объективом AF-S Nikkor 55-300 mm с установкой фокусного расстояния 90 мм. Формат записи Full HD 1080\*1800 50p.

Для всех изученных систем рассчитаны и приведены значения кислородного баланса, а также теоретический объем газообразных продуктов горения при нормальных условиях. Результаты проведенных расчетов представлены в таблице 1.

Из таблицы видно, что для нитратных систем максимальное количество газообразных продуктов приходится на пиротехнические смеси имеющие кислородный баланс, близкий к 0, а также  $\pm 10\%$  в положительную или отрицательную сторону. Однако такие смеси обладают меньшими теплотами реакции, чем смеси с резко отрицательным кислородным балансом (более 30%). В то же время значительное снижение количества газообразных продуктов реакции в таких системах может привести к потере работы, необходимой для разрушения оболочки имитационного боеприпаса и созданию требуемого звукового эффекта разрыва снаряда.

Постоянное количество газа для перхлоратных систем объясняется разницей разложения непосредственно самого перхлората и нитрата калия. Существенный вклад в количество газообразных продуктов, выделяющихся в результате реакции горения нитратных систем, вносит азот, образующийся при разложении нитрата калия ( $KNO_3$ ).



С другой стороны, для достижения требуемого эффекта нет необходимости полного воспроизводства бризантно-фугасного эффекта, характерного для боеприпасов на тротиле. Для этого достаточно сделать возмущение в атмосфере хотя бы за счет теплового эффекта реакции.

Для устранения использования бризантных ВВ в имитационных патронах, исходя из данных представленных в таблице 1 была рассмотрена идея

Таблица 1

Расчетные данные модельных пиротехнических систем

№	Пиротехнический состав	Соотношение компонентов, %	K <sub>6</sub> , %	V <sub>0</sub> при н.у., мл/г
1.	Нитрат калия (KNO <sub>3</sub> ) – Al - C <sub>23</sub> H <sub>36</sub> O <sub>7</sub>	71.2/26.7/2.1	0	124,35
1.1		70/28/2	-1,39	120,19
1.2		80/18/2	+11,38	132,03
1.3		20/78/2	-65,716	65,49
1.4		30/68/2/	-52,86	76,59
2.	Нитрат калия (KNO <sub>3</sub> ) – Mg - C <sub>23</sub> H <sub>36</sub> O <sub>7</sub>	65.4/32.5/2.1	0	118,0063
2.1		70/28/2	-31,88	120,9084
2.2		80/18/2	-8,17	132,0331
2.3		20/78/2	-150,43	65,4983
2.4		30/68/2	-126,72	76,58662
3.0	Нитрат калия (KNO <sub>3</sub> ) – ПАМ-4 - C <sub>23</sub> H <sub>36</sub> O <sub>7</sub>	53.72/44.44/1.84	0	99,3503
3.1		70/28/2	+3,77	120,9445
3.2		80/18/2	+14,75	132,0336
3.3		20/78/2	-51,11	65,49897
3.4		30/68/2/	-40,14	76,58808
4.	Перхлорат калия (KClO <sub>4</sub> ) – Al - C <sub>23</sub> H <sub>36</sub> O <sub>7</sub>	67.98/29.69/2.33	0	43,32
4.1		70/28/2	+3,14	43,32
4.2		80/18/2	+16,65	43,32
4.3		20/78/2	-64,40	43,32
4.4		30/68/2/	-50,89	43,32
5	Перхлорат калия (KClO <sub>4</sub> ) – Mg - C <sub>23</sub> H <sub>36</sub> O <sub>7</sub>	62.75/34.26/2.99	0	43,32
5.1		70/28/2	9,60	43,32
5.2		80/18/2	20,80	43,32
5.3		20/78/2	-46,41	43,32
5.4		30/68/2/	-35,21	43,32
6	Перхлорат калия (KClO <sub>4</sub> ) – ПАМ-4 - C <sub>23</sub> H <sub>36</sub> O <sub>7</sub>	49.88/48.12/2	0	43,32
6.1		70/28/2	+0,30	43,32
6.2		80/18/2	+10,78	43,32
6.3		20/78/2	-52,11	43,32
6.4		30/68/2/	-41,62	43,32

вторичного догорания в атмосфере металлических порошков и полупродуктов взрыва пиротехнических составов. Известно, что тепловой эффект реакции горения порошковых металлов составляет примерно 40-60 МДж/кг, в отличие от 4,2 МДж/кг у ТНТ. [7]

Пиротехнический заряд массой 1 кг инициировался центральным зарядом тетранитропентаэритрита (ТЭН) весом 20-30 г. Химический состав пиротехнического заряда не позволяет устойчиво детонировать, т.к. количество газообразных продуктов химических превращений не превышает 3-5% масс, и их расширение не несет достаточно энергии для механической инициации химических реакций в не прореагировавших слоях пиротехнического заряда.

Вместе с тем, мощности применяемого инициатора из ТЭНа достаточно, для инициации химических процессов горения металло-солевых пиротехнических составов, исследуемых в настоящей работе. Время взрыва применяемого инициатора составляет  $7 \cdot 10^{-7} - 1 \cdot 10^{-6}$  с, что соответствует времени взрыва  $1,1 \cdot 10^{-6} - 1,3 \cdot 10^{-6}$  с цилиндрического заряда ТНТ массой 1 кг при отношении длины к диаметру (L/D) равному 1.

Если не учитывать всевозможные интерференционные эффекты и отраженные ударные и акустические волны, то в первом приближении можно считать акустическим излучателем атмосферное тело в момент перехода ударной волны в звуковую, т.е. при уменьшении скорости расширения продуктов взрыва до звуковой. При этом, в конденсиро-

ванных ВВ типа ТНТ после прохождения волны детонации в заряде тепловыделение закончено, и дальнейшие процессы идут с понижением температуры, в основном за счет расширения газообразных продуктов.

Характеристической длиной волны излучения, по крайней мере первой гармоники можно предположить размеры атмосферного тела в момент перехода ударной волны в звуковую. Исходя из формулы Садовского [8]:

$$dP=1000*(1.050m^{0.333}/r + 4.3m^{0.667}/r^2 + 1400m/r^3)$$

где  $dP$  – давление в кПа;  $m$  – масса тротила в тоннах;  $r$  – расстояние до взрыва в метрах.

Из приведенной выше формулы следует, что при подрыве 1 кг ТНТ давление в 0,1 МПа имеет атмосферное тело радиусом 2,8-3м, в котором ударная волна перерождается в акустическую с высокой энергией. При пересчете на скорость звука, частота таких акустических колебаний будет составлять 100-150 Гц, что является характерной частотой при взрыве зарядов такой массы или выстрелов оружейных систем.

Фотография взрыва заряда ТЭНа представлена на рисунке 1.

Фотография светящегося облака взрыва ТЭНового инициатора в пределе разрешающей способности видеокамеры через 40 мс после подачи импульса (рис. 1) показывает, что продукты взрыва к этому моменту времени практически прекратили движение в атмосфере, происходит догорание конденсированных продуктов и оболочки заряда. Максимальный размер светящегося облака составляет порядка двух метров.

Взрыв инициатора с инертным зарядом принципиально отличается от предыдущего эксперимента. На рисунке 2 представлен подрыв инициатора с

гипсовым наполнением вместо пиротехнического состава.

Из рисунка 2а видно, что на момент времени  $t=40$  мс произошло разрушение оболочки патрона и заряд гипса, диспергируемый избыточным давлением продуктов взрыва инициатора, сметается в атмосферу узкими длинными струями или джетами со скоростью приближенной к скорости расширения продуктов взрыва. Неоднократные работы по метанию объектов зарядом конденсированных бризантных ВВ дают начальные скорости 1-3 км/сек. Торможение выбрасываемых в атмосферу объектов зависит от баллистических коэффициентов сметаемых тел, в том числе от их размеров и плотности. Очевидно, что раздробленный взрывом инициатора гипсовый заряд имеет полидисперсный состав, торможение в невозмущенной атмосфере происходит дифференциально, в первую очередь для мелкой фракции. Зависимости движения полидисперсных систем при их метании в сплошной затопленной среде имеют гораздо более сложный механизм, не входящий в объем настоящей работы.

На рис. 2б в момент времени  $t \sim 80$  мс видно, что процессы торможения гипсового заряда уже прекратились, и начались процессы образования аэрозолей и их перемешивания с атмосферой.

Подрыв патрона с пиротехническим составом № 1.4 из таблицы 1 представлен на рисунке 3.

На рисунке видно, что в момент времени  $t$  40 мс происходит выброс диспергированного горящего пиротехнического заряда в атмосферу, причем скорость разлета, диаметр наблюдаемого объекта (6-8 м) и интенсивность джетов значительно больше чем в предыдущем эксперименте. В то же время яркость джетов и крупнодисперсных перегретых объектов ( $Al_2O_3$ ) принципиально соответствуют предельной температуре горения в атмосфере алюминиевого порошка.



Рис.1. Фотография взрыва заряда ТЭНа массой 20 гр.



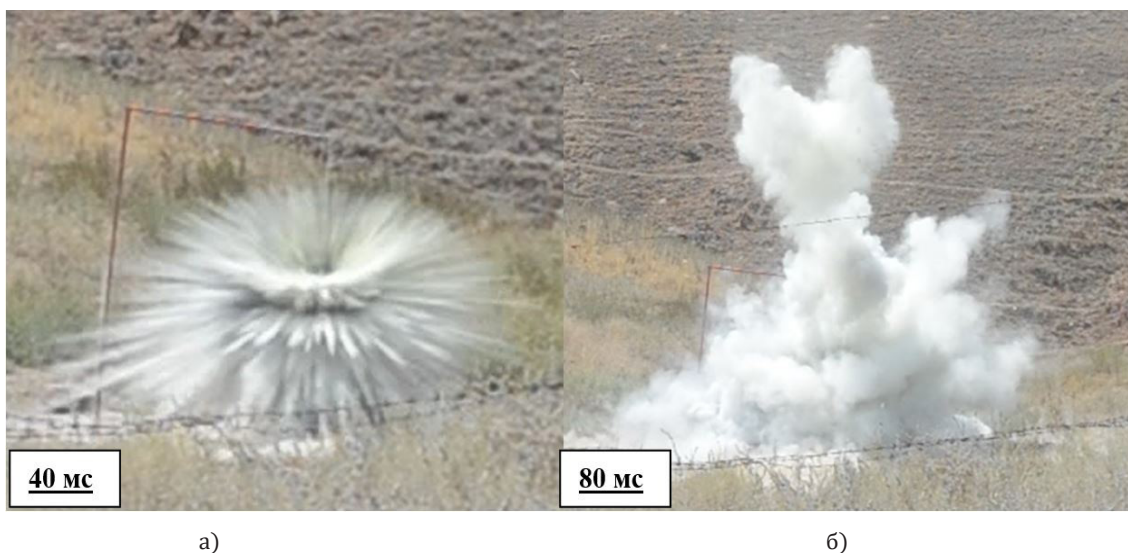


Рис. 2. Подрыв инертного заряда в атмосфере.

Увеличенные диаметр, а также скорость метания в атмосферу разогретого алюминиевого порошка и полупродуктов взрыва можно объяснить участием в химических процессах взрыва прилегающих к инициатору слоев пиротехнического состава. Ввиду того, что пиротехнический состав не является детонационно способным детонация в нем затухает при разогреве и начале горения последующих слоев этого заряда. Согласно литературным данным [9] время горения алюминиевых частиц дисперсностью 40-120 мкм составляет 15-100 мс при аналогичных условиях. Этим объясняется, что на рисунках 3б, 3в при сохранении сверхзвуковых течений продуктов взрыва в атмосфере в момент времени  $t \sim 80$  мс,  $t \sim 120$  мс продолжается горение этих алюминиевых частиц. Нагрев продуктов взаимодействия с 300К до 3000К приводит к 10-ти кратному увеличению давления, что дополнительно является вкладом в процесс образования звуковой волны при работе такого пиротехнического заряда.

Кроме того следует учесть, что тепловое выделение пиротехнических составов на металл – солевой основе на порядок и более превосходит энергосодержание например чистого ТНТ (4200 КДЖ), что также является положительным фактором при создании имитации звукового и светового эффектов взрыва боеприпасов с содержанием пиротехнической смеси 0,5 и более кг.

Для изучения брызганности полученных имитационных пиротехнических изделий были проведены эксперименты при установке патронов на грунт и металлическую пластину толщиной 2 мм. Иницирование патронов проводилось со стороны, обратной опоре.

После проведения эксперимента было установлено, что металлическая пластина имела вмятину по контуру имитационного патрона, а сухой грунт незначительные повреждения на глубину до 5 см.

Это указывает на то, что основная масса пиротехнического заряда, как минимум в нижней полусфере расширения продуктов взрыва не догорала и не вносила вклад в создание звуковой волны, что хорошо коррелирует с теорией взрыва газопылевых взрывчатых воздушных смесей.

На рисунке 1 и 2 размер атмосферного тела излучения звуковой волны имеет параметры 1-2 м, на рисунке 3 – можно считать, что тело излучения, в котором происходят физико – химические сверхзвуковые процессы имеет размер порядка 6-8 м, что снижает частоту излучаемого звука и увеличивает амплитуду звукового воздействия.

В проведенных нами экспериментах на расстоянии измерения 50 м звуковое давление, измеренное с помощью цифрового шумомера и анализатора спектра Алгоритм-05, составляло 160-180 дБ, что хорошо коррелируется со звуковым давлением осколочно – фугасного снаряда калибра 152 мм на том же расстоянии.

## Заключение

В представленной работе изучена возможность использования пиротехнических составов в имитационных боеприпасах. Проведен анализ пиротехнических составов, из которого следует, что наиболее оптимальным для обеспечения требуемого светового и звукового эффектов работы имитационных боеприпасов являются металлсодержащие составы с резко отрицательным кислородным балансом. В этом случае первичный инициатор (ТЭН) распыляет в атмосферу подогретые за счет начала реакции горения пиротехнического состава порошки металла.

Установлено, что проведенные в представленной работе исследования дают возможность заменить ТНТ на пиротехнические составы в имитаци-

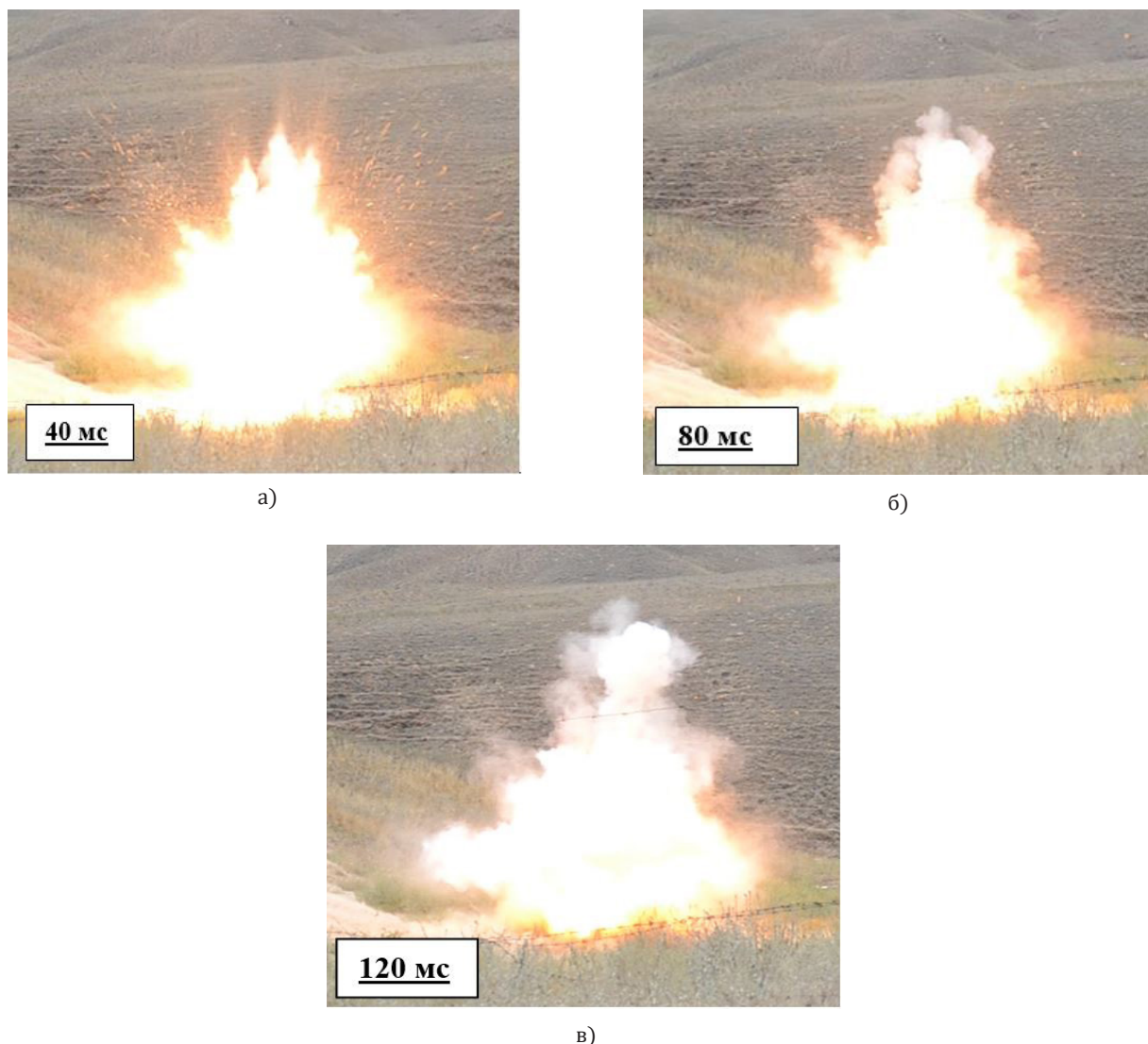


Рис. 3. Фотография взрыва пиротехнического заряда массой 1 кг.

онных боеприпасах, что значительно увеличит срок их эксплуатации, а также повысит безопасность при их производстве. При этом модернизированный имитационный патрон не имея в своем составе бризантных ВВ, создает тот же звуковой и световой эффект, что и штатные боеприпасы.

### Литература

- [1]. С.Л. Раско, А.Г. Овчаренко. Уманский И.М. Эксплуатационная безопасность конденсированных взрывчатых веществ: учебное пособие / Изд-во Алт. гос. тех. ун-та, 2006. 147 с.
- [2]. Дремин А.Н., Шведов К.К. Определение давления Чепмена – Жуге и времени реакции в детонационной волне мощных ВВ / М.: ПМТФ, №2, 1964, С. 154-159.
- [3]. Фотография химической реакции // Соросовский образовательный журнал, 1999, №8, с. 48-54.
- [4]. Горная энциклопедия: В 5 т./ Гл. ред. Е. А. Козловский. – М.: Сов. энцикл., 1984-1991.
- [5]. В.Н. Дик. Взрывчатые вещества, пороха и боеприпасы отечественного производства. Справочные материалы: Справочник. Часть 1 – Минск: Охотконтракт, 2009. – 280 с.
- [6]. Мельников В.Э. Современная пиротехника. – М.: 2014, 480 с.
- [7]. В.И. Малинин, С.Ю. Серебренников, А.М. Бербек. Анализ особенностей горения порошков металлов в смесях с воздухом, водой и диоксидом углерода // Пожаровзрывобезопасность, 2010, Т.19, №4, с.12-17.
- [8]. М.А. Садовский. Механическое действие воздушных ударных волн взрыва по данным экспериментальных исследований // Физика взрыва. Сборник №1 научно исследовательских работ в области физики взрыва. – Академия наук СССР, 1952.
- [9]. Похил П.Ф., Беляев А.Ф., Фролов Ю.В. и др. Горение порошкообразных металлов в активных средах. М.:Наука, 1972., – 302 с.

**Research possibilities of application of pyrotechnic compositions in simulation ammunition**

I.V. Chshegolkova<sup>1</sup>, R.G. Abdulkarimova<sup>2</sup>, I.M. Vongai<sup>1</sup>, S.B. Vodenicharov<sup>3</sup>, N.T. Makulbek<sup>1</sup>

<sup>1</sup>«AlmaDK» LLP, Turkebayev, 199, Almaty, Kazakhstan

<sup>2</sup>Al-Farabi Kazakh National University, ave. Al-Farabi 71, Almaty, Kazakhstan

<sup>3</sup>Institute of metal science, equipment and technologies with hydro-aerodynamics centre, BAS, Bulgaria

**ABSTRACT**

The possibility of replacing TNT in simulation ammunition with pyrotechnic mixtures is considered. The selection and analysis of pyrotechnic compositions were carried out, theoretical calculations of the oxygen balance and the volume of gaseous explosion products for each system were carried out. On the model system, the initiation mechanism of the main pyrotechnic charge is considered. The operation of the heating element initiator was studied both in pure form and with the use of an inert filler. The formation of tracks of metal particles and their combustion in the atmosphere is shown. The light and sound characteristics of simulation munitions on selected pyrotechnic mixtures were established. The brisant effect of the resulting pyrotechnic products was investigated.

*Keywords:* pyrotechnic compositions, detonation, trotyl, tetranitropentaerythritol, detonator capsule, explosive.

**Имитациялық өнімдерде пиротехникалық құрамдарды мүмкіндігін зерттеу**

И.В. Щеголькова<sup>1</sup>, Р.Г. Абдулкаримова<sup>2</sup>, И.М. Вонгай<sup>1</sup>, С.Б. Воденичаров<sup>3</sup>, Н.Т. Мақұлбек<sup>1</sup>

<sup>1</sup>«АлмаДК» ЖШС, Түркебаев к., 199, Алматы қ., Қазақстан

<sup>2</sup>эл-Фараби атындағы Қазақ Ұлттық Университеті, эл-Фараби даңғ. 71, Алматы, Қазақстан

<sup>3</sup>Металлургия, жабдықтар және технологиялар институты, БАС жанындағы «Академик А. Балевский» гидро-аэродинамика орталығымен, София, Болгария

**АҢДАТПА**

Имитациялық оқ-дәрілерде ТНТ-ны пиротехникалық қоспалармен алмастыру мүмкіндігі қарастырылды. Пиротехникалық құрамдарды таңдау және талдау өткізілді. Модельдік жүйеде негізгі пиротехникалық зарядтың қоздыру механизмі қарастырылды. Таңдалған пиротехникалық қоспалардағы жарық және дыбыстық оқ-дәрілердің сипаттамалары анықталды.

*Түйін сөздер:* пиротехникалық қоспалар, жарылу, тротил- ТНТ, тетранитропентаэритрит, детонатор капсуласы, жарылғыш зат.