УДК 623.451.4

Анипко О.Б., Хайков В.Л.

АНАЛИЗ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ ПОРОХОВЫХ ЗАРЯДОВ КАК ЭЛЕМЕНТ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА АРТИЛЛЕРИЙСКИХ БОЕПРИПАСОВ

Состояние с боеприпасами к ствольным системам, в общем, для вооруженных сил Украины и для военно-морских сил в частности обусловлено рядом объективных причин, к которым следует отнести:

– «значительность запасов» – объемы хранимых боеприпасов в несколько раз превышающую потребность, как по количеству, так и по номенклатуре;

– «состояние запасов» – все хранимые боеприпасы находятся на послегарантийном этапе их эксплуатационного цикла;

– «безопасность применения» – их применение по назначению по мере дальнейшего хранения без «освежения» запаса связана с возрастающей угрозой нанесения ущерба собственному оружию, его носителю и личному составу;

– «эффективность использования по назначению» – по мере увеличения календарного срока хранения с целью обеспечения требуемого боевого эффекта, возрастает необходимость в дополнительной коррекции данных для стрельбы за счет введения специфических поправок, связанных с геронтологическими изменениями физико-химической природы пороха, влияющей на баллистику ствольной системы.

Многочисленная статистика показывает, что пригодность боеприпаса к применению по назначению в процессе его старения в основном определяется сохраняемостью его порохового метательного заряда, поэтому рассмотрение процедур контроля состояния ограничим методами, относящимися к пороху.

Если принять допущение о том, что нормативный (проектный) средний срок эксплуатации всей номенклатуры используемых артиллерийских нитроцеллюлозных порохов составляет величину равную 40–50 лет, с гарантийными обязательствами производителя в течении первых 10-ти лет, то при среднем календарном сроке хранения боеприпасов морской артиллерии, составляющем на сегодня 20–25 лет, боезапас находится в состоянии исчерпания своего ресурса по метательному заряду с нижней границей 40–50 % и верхней 50–62 %. При этом следует отметить, что он приблизился к зоне риска ускорения автокаталитического разложения его основного элемента – нитроцеллюлозы. В этой связи актуальными и своевременными мероприятиями являются следующие оценки:

– динамики изменения состояния;

– влияние изменений на эффективность использования боезапаса по назначению;

– влияние изменений параметров характеризующих безопасность боевого применения и безопасность хранения.

Рассмотрение литературы по проблеме физического старения нитроцеллюлозного пороха показывает то, что как явление, приводящее к неконтролируемым последствиям, оно заявило о себе сразу же после запуска в промышленное производство боеприпасов на основе нитроцеллюлозы, а глубина понимания, протекающих при этом процессов, и способы противодействия им, формируются вплоть до сегодняшнего дня.

Исторически сформировались два самостоятельных способа анализа проблемы. Первый из них характеризует баллистическое ее рассмотрение и базируется на понятии баллистической стабильности порохового заряда. Основу второго составляет физико-химическая стабильность пороха как твердого тела. Имеет место следующее отношение между этими двумя собирательными понятиями: физико-химическая стабильность определяет баллистические качества пороха как энергетического материала.

Масштаб проблемы геронтологии пороха, особенно на начальном его этапе 1898–1910 гг. отмечен рядом крупных катастроф [1], произошедших на кораблях в различных флотах мира, многие из которых сопровождались многочисленными жертвами и потерей боевых единиц. Первопричина этих событий заключалась в несовершенстве технологии производства пороха, неправильной организации хранения боеприпасов в целом и метательных зарядов в частности. Перечень некоторых из катастроф приведен в таблице 1. В большинстве этих случаев боезапас на момент пожара и взрыва находился в состоянии хранения.

Так уже в 1913 г. в качестве рекомендаций по хранению боеприпасов отмечается следующее [2]:
… хранение пороха на кораблях должно быть сопряжено с многочисленными предосторожностями. Порох при долгом хранении теряет свои качества, а при нахождении в помещениях с высокими температурами может сделаться опасным …».

К числу значительных катастроф, произошедших с боевыми кораблями за последние 100 лет, следует отнести следующие инциденты:

– взрыв плавучего судна-арсенала «Маунт Худ» (1944), надолго отбросившего назад идею о концентрации значительного количества боезапаса в объеме одного корабля;

– взрыв пороховых зарядов линкора «Айова» (1989).

Таблица 1 – Катастрофы имевшие место на флотах, связанные со взрывами боезапаса

№/№	Дата	Корабль	Страна	Место	Вид	Причина (последствие)
1	01.09.1905	Броненосец «Микаса»	Япония	Сасебо	взрыв погребов	не установлена (гибель корабля)
2	21.01.1906	Линкор «Акюдабан»	Бразилия	Жакарепагуа	взрыв	возгорание пороха (гибель корабля)
3	13.03.1906	Линкор «Керседж»	США	о. Куба	пожар	самовозгорание пороха 330-мм картузных зарядов (поврежден)
4	12.03.1907	Линкор «Иена»	Франция	Тулон	взрыв	самовозгорание пороха типа «В» (гибель корабля)
5	30.04.1908	Крейсер «Мацусима»	Япония	Мако	взрыв боезапаса	не установлена (гибель корабля)
6	25.09.1911	Линкор «Либерти»	Франция	Тулон	взрыв	самовозгорание пороха типа «В» (гибель корабля)
7	04.11.1914	Л. крейсер «Карлруэ»	Германия	о. Тринидад	взрыв носовой артпогреб	не установлена (гибель корабля)
8	26.11.1914	Линкор «Булварк»	Великобритания	р. Темза	взрыв артпогреб	не установлена (гибель корабля)
9	27.09.1915	Линкор «Бенедетто Брин»	Италия	Бриндизи	пожар и взрыв боезапаса	не установлена (гибель корабля)
10	30.12.1915	Крейсер «Натал»	Англия	Кромарти	внутренний взрыв	не установлена (гибель корабля)
11	11.03.1916	Крейсер «Капитан Прат»	Чили	-	возгорание взрыв пороха	не установлена (поврежден)
12	02.08.1916	Линкор «Леонардо да Винчи»	Италия	Таранто	пожар и серия взрывов боезапаса	не установлена (гибель корабля)
13	07.10.1916	Линкор «Императрица Мария»	Россия	Севасто поль	пожар и взрыв боезапаса	не установлена (гибель корабля)
14	14.01.1917	Крейсер «Цукуба»	Япония	Йокосука	пожар и взрыв порох. погреба	не установлена (поврежден)
15	09.07.1917	Линкор «Венгерд»	Великобритания	Скапа Флоу	внутренний взрыв	не установлена (гибель корабля)
16	12.04.1918	Линкор «Кавачи»	Япония	Токуяма	внутренний взрыв	не установлена (гибель корабля)
17	08.06.1943	Линкор «Муцу»	Япония	Хасирадзима	взрыв боезапаса	не установлена

Подробные материалы по фактам ненормального действия артиллерийских боеприпасов изложены авторами в работе [16].

Что касается арсенального хранения пороха, то количество катастроф и чрезвычайных происшествий в местах хранения боеприпасов по количеству случаев и масштабам их последствий намного превышают корабельную статистику.

В период с 1995 по 2010 гг. в мире имели место 189 чрезвычайных ситуаций (табл. 2) на наземных объектах хранения боеприпасов и их элементов. Из данного количества на долю стран СНГ и Украины приходится 26 (13,8 %) случаев, происшедших в период с 1992 по 2009 гг., таким образом вклад такого большого, как по площади, так и по количеству мест хранения, региона как СНГ в общий список инцидентов находится на допустимом уровне.

Таблица 2 – Данные о чрезвычайных ситуациях в арсеналах и базах [3]

Причины	Количество случаев	Процент
Самовозгорание пороха	7	3,7
В процессе утилизации	17	9
Электрические замыкания	5	2,6
Пожары	48	25,4
Халатность	24	10,6
Высокая температура	3	1,6
Воздействие света	8	4,2
Не известная причина	68	36
По вине охраны	6	3,2
Другие причины	3	1,6
Всего	189	100

В 1998 г. руководство по хранению пороха «Propellant management guide» [4], объединило в себе рекомендации по организации хранения нитроцеллюлозных порохов и систему их контроля в США и странах НАТО. В предисловии к его основному содержанию в частности говорится:

«…Само по себе физическое присутствие пороха в определенном месте требует усилий по организации его хранения. Среди всех энергетических материалов военного назначения только нитроэфирные пороха (главным образом на основе нитроцеллюлозы) имеют склонность к самовозгоранию без предварительного изменения своего внешнего состояния. Такое их свойство может привести к ущербу с катастрофическими масштабами. Артиллерийские пороха и пороха для стрелкового оружия являются наиболее нестабильными, а поэтому опасными материалами, к тому же наиболее часто находящимися в служебном обращении и на хранении в базах и на складах. Состояние пороха может непредсказуемо меняться. Например, фиксировались случаи его разложения до неустойчивого состояния в течение четырех (пяти) лет со дня производства. Недостаточность мер, изложенных в руководствах по хранению, способствовали нескольким случаям его самовозгорания, произошедших в базах хранения оружия…»

Таким образом, за 85-летний временной интервал, со дня появления ранее упомянутых рекомендаций по хранению 1913 г., эксплуатация пороха в условиях корабля-носителя оружия и арсенала, как органа обеспечения, принципиально никак не упростилась.

На сегодня состав нитроцеллюлозных порохов усложнился. В пороховую массу кроме нитроцеллюлозы входят еще 3–5 компонентов, которые в ее составе могут выполнять около 13-ти функций: от пластификации и пламягашения, до уменьшения эрозии канала ствола и улучшения воспламеняемости. Общее число компонентов вводимых в нитроцеллюлозный порох достигло величины 15–18. Значительно возросла номенклатура порохов военного назначения, так например, совокупность американских порохов сухопутных войск, включает в себя 408 наименований [4].

В вооруженных силах стран НАТО проблеме контроля состояния боеприпасов и пороховых метательных зарядов уделяется должное внимание. Это выражается, прежде всего:

– в развитии методов оценки состояния боеприпасов и пороховых зарядов, оценке последствий трансформации их физико-химических и баллистических характеристик;

– в проведении комплекса научно-исследовательских работ по разработке новых методов контроля;

– в разработке аппаратуры, реализующей прогрессивные методики наблюдения за порохами и боеприпасами;

– во введении новых и корректуре уже принятых соглашений по стандартизации (STANAG) и директивных документов, связанных с эксплуатацией боеприпасов и их элементов (AOP – allied ordnance

publication). Названия документов в сфере боеприпасов, принятых в период 1991–2008 гг. приведен в таблице 3, список не учитывает национальных стандартов стран участников.

Таблица 3 – Соглашения по стандартизации стран НАТО регулирующие вопросы обращения с боеприпасами и оценки и баллистических свойств

№/№	Вид и номер соглашения	Год издания	Наименование стандартизирующего соглашения НАТО
1	STANAG 4178	1991	Test procedures for assessing the quality of deliveries of nitrocellulose from one NATO nation to another
2	STANAG 4400	1993	Derivation of thermochemical values for interior ballistic calculation
3	STANAG 4113	1993	Pressure measurement by crusher gauges
4	STANAG 4114	1997	Measurements of projectile velocities
5	STANAG 4115	1997	Definition and determination of ballistic properties of gun propellants
6	STANAG 4117	1998	Explosives, stability test procedures and requirements for propellants stabilized with diphenylamine, ethyl centralite or mixtures of both
7	STANAG 4367	2000	Thermodynamic interior ballistic model with global parameters
8	STANAG 4527	2000	Explosive, chemical stability, nitrocellulose based propellants, procedures for assessment of chemical life and temperature dependence of stabiliser consumption rates
9	STANAG 4147	2001	Chemical compatibility of ammunition components with explosives (non-nuclear applications)
10	STANAG 4541	2003	Explosives, nitrocellulose based propellants containing nitroglycerin and stabilized with diphenylamine, stability test procedures and requirements
11	STANAG 4110	2005	Definition of pressure terms and their interrelationship for use in the design and proof of cannons or mortars and ammunition
12	STANAG 4315	2006	The scientific basis for the whole life assessment of munitions
13	STANAG 4582	2007	Explosives, nitrocellulose based propellants, stability test procedure and requirements using heat flow calorimetry
14	STANAG 4620	2007	Explosives, nitrocellulose based propellants, stability test procedures and requirements using stabilizer depletion
15	AOP 48	2008	Explosives, nitrocellulose based propellants, stability test procedures and requirements using stabilizer depletion

Ввиду того, что геронтологические изменения боеприпаса воздействуют на боевой эффект в литературе практически нет данных о сравнительных характеристиках боеприпасов с различным календарным сроком хранения. В этой связи интересен анализ отстрела 20 мм патронов (предположительно к системе Oerlikon 20 mm) произведенной в 1998 г. в Naval surface warfare center военно-морских сил США [5].

Испытания проводились для трех временных отрезков хранения: 0 лет (календарный срок боеприпасов перед закладкой не указан), 10 и 20 лет. При отстрелах использованы боеприпасы 12-ти учетных партий. Первые 4-ре характеризовали момент закладки на хранение, следующие 4-ре десятилетний интервал, остальные были 20-летние.

Результат усреднения данных внутри партий одного календарного срока, выполненный авторами, показан в таблице 4. Так как в оригинале была использована английская метрическая система, все величины переведены в систему СИ. В скобках столбцов 4, 5 указано процентное возрастание (убывание) соответствующих характеристик относительно усредненного значения для партий с «возрастом» 0 лет.

Анализ публикации [5] и ранее приведенных стандартов позволяет сделать следующие выводы:

– контролируемые баллистические характеристики, за исключением времени выстрела, одинаковы с контролируемыми, в отечественной практике баллистическими параметрами;

– выбранная совокупность характеристик позволяет отслеживать вариации боевого эффекта, а контроль непревышения пороховыми газами порогового давления и контроль времени его наступления способствует оценке безопасности стрельбы;

– изменения баллистических характеристик боеприпасов при их хранении в условиях действия совокупного климатическо-временного фактора имеют нестационарный характер;

– обращает на себя внимание отдельное друг от друга рассмотрение характеристик баллистики порохового заряда и физико-химических характеристик пороха без поиска корреляционных взаимосвязи, подобных формуле ИКОПЗ, в которой, например, по уменьшению количества летучих компонентов оценивают изменения в баллистике. Такое состояние можно объяснить либо отсутствием этой связи для иностранных порохов (ее «слабым» проявлением), что маловероятно, либо нечувствительностью выбранных в качестве инструментально-определяемых физико-химических характеристик к результирующему баллистическому эффекту.

Таблица 4 – Результаты полигонных испытаний 20 мм боеприпасов после долгосрочного их хранения

№/№	Характеристики	Результаты стрельб		
		0 лет (*)	10 лет (**)	20 лет (**)
1	Давление в канале ствола, МПа	378,18	371,63 (– 1,73 %)	379,38 (+ 0,32 %)
2	Начальная скорость, м/с	1032,51	1030,22 (– 0,22 %)	1031,38 (– 0,11 %)
3	Время выстрела, мс	2,6	2,5 (+ 3,9 %)	2,55 (+ 1,9 %)
4	Срабатывание трассера, %	97,75	95,25 (– 2,6 %)	95,25 (– 2,6 %)

Примечание: * – перед закладкой на длительное хранение; ** – после 10, 20 лет хранения в условиях арсенала.

Организация контроля без выявления и дальнейшего использования корреляционных связей между физико-химическими характеристиками и баллистическим эффектом лишает систему гибкости, делает ее трудоемкой и финансово затратной. Для пояснения этого тезиса приведем три цитаты из «Ordnance pamphlet – 4. Ammunition. Instruction for the naval service» 1943 г. [6], посвященного обращению с порохом:

(1) *«…По мере того как зерно пороха подвергается процессу разложения в нем всегда присутствует азотная (азотистая) кислоты, молекулы которой атакуют остаточный растворитель (этанол), содержащийся в некотором количестве в пороховой массе, при этом качество поверхности ухудшается. Микроскопические тонкие трещины развиваются по краям порохового элемента, там происходит значительная потеря летучих веществ. В этих местах зерно делается ломким, а его структура начинает выкрашиваться и ломаться…».*

(2) «*…При хранении пороха не должно быть никаких вариаций с весом порохового заряда, однако такие изменения возможны, если происходят следующие явления: поглощение влаги, которое обусловит замедление горение пороха, что приводит к уменьшению дульной скорости по сравнению с первоначальной кондицией; удаление остаточных летучих веществ, содержащихся в пороховой массе из-за чрезмерной жары, что обусловит убыстрение горения пороха и даст приращение дульной скорости.*»

(3) «*…Следует отметить, что потеря устойчивости пороха, пока она не сделает порох фактически непригодным, сама по себе заметно не влияет на его баллистику…»*

Первая из них на качественном уровне дает описание механизма разложения порохового элемента, вторая показывает связь изменения физико-химических характеристик с баллистическим эффектом. Однако третья фактически отрицает ранее сказанное в первом и во втором утверждениях. Данный факт подчеркивает противоречивость эксплуатационных документов, основанных на гипотезе «несущественности» процесса разложения.

В 2001 г. в работе сотрудников концерна «Нитрохимия» во главе с Б. Фогельзенгером [7], дается общая качественная картина процессов сокращающих срока службы нитроцеллюлозного пороха, основными из них являются следующие (рис. 1):

– деградация нитроцеллюлозы;

– деградация стабилизатора химической стойкости;

– диффузия продуктов в пороховой массе;

– вторичная деградация компонентов распада и возникновение проблемы их несовместимости.

В 2006 г. исследователи Ливерморской национальной лаборатории США А. Бурнхан, Л. Фрид [8], исследуя вопросы деградации пластических бризантных взрывчатых веществ, устанавливают количественную модель протекания начальной стадии деградации нитроцеллюлозы. Их уравнение, записанное с использованием инженерных формул, приводится ниже:

$$C_6H_{7,7}N_{2,3}O_{9,6} \rightarrow C_{5,95}H_{7,99}N_{1,9}O_{8,76} + \text{нитропроизводные ДФА} + 0{,}001\ N_2 + 0{,}024\ N_2O + \\ + 0{,}012\ CO + 0{,}012\ CO_2 + 0{,}012\ H_2O,$$

где ДФА – дифениламин.

Эта зависимость показывает, что нитроцеллюлоза как нитрополимер при начальном содержании в ней азота 12–12,5 % постепенно деградирует к состоянию с содержанием азота в 9–10 %. Этот процесс сопровождается образованием 4-х газовых компонент, воды и производных дифениламина. Распад нитрополимера приводит к потери 7,2 % его массы, 82 % которой удерживается стабилизатором химической стойкости, играющим роль своеобразной губки и выполняющим двойную функцию:

– агента удержания в составе пороховой массы веществ важных с точки зрения постоянства энергетики пороха;

– замедлителя течения автокаталитических реакций.

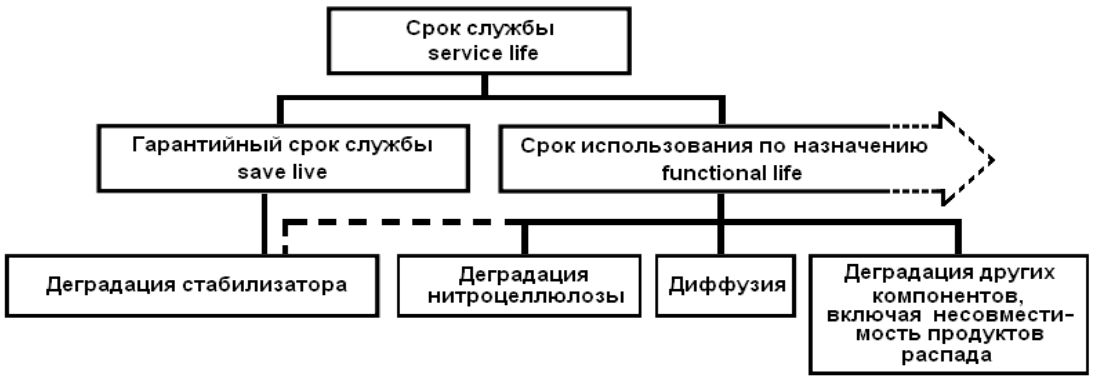

Рисунок 1 – Основные причины, влияющие на продолжительность срока службы пороха

Безвозвратные потери за счет химических изменений, протекающих в направлении «твердое тело – газ», составляют 1,3 % от первичной массы.

Таким образом, если взять следующую условную пороховую рецептуру, где содержание ее компонентов взято в процентах, то при деградации вещество может терять до 3,3 % своей массы за счет потерь в виде: 1 % пластификатора; 1 % воды (вторую половину общего количества влаги будем считать связанной и удерживаемой в пороховой массе) и 1,3 % газовыделения за счет энергетической основы. Если пороховой заряд 100 мм корабельного орудия приравнять к массе 5250 г, то при длительном его хранении можно получить предельный «дефект» массы (недостающая масса) равный 173,25 г от первоначального значения. Такой эффект полностью соответствует физическим представлениям, приведенным в цитатах (1, 2) выше упомянутого «Ordnance pamphlet – 4» [6].

энергетическая основа:	нитроцеллюлоза (азот 12 %) –	96,0
пластификатор:	этанол –	0,5
	диэтиловый эфир –	0,5
стабилизатор химической стойкости:	дифениламин –	1,0
вещества паразиты:	вода (влага) –	2,0

Исследования процессов старения пороховых зарядов раздельного заряжания 4Ж40 на этапе 25–30 лет, приведенное в [17], дало обнаружение «дефекта» массы в ≈ 400 г., что при средней массе пороха в 5000 г дает убывание массы до 8%, что сопоставимо с результатом вышеприведенной модели разложения, ввиду того, что корпус 4Ж40 не металлический, а сгораемый на нитроцеллюлозной основе.

Таким образом, если массу артиллерийского выстрела представить в виде системы, изображенной на рис. 2, то пороховой заряд следует рассматривать как основной, и относительно других структурных элементов выстрела, самый динамично меняющий свою массу компонент.

В 2011 г. в серии «International ammunition technical guideline» издаются рекомендации «Surveillance and in-service proof» [9]. Этот документ наряду с трактовкой терминов и методов физико-химических исследований порохов приводит модели уменьшения этого срока при увеличении средней температуры хранения.

Основным фактором, влияющим на сокращение срока службы пороха, убыстряющего процесс деградации нитроцеллюлозы (в том числе стабилизатора химической стойкости) и увеличивающего скорость

молекулярной диффузии, является температура окружающей среды. Приведенная модель поясняется следующим образом [9]:

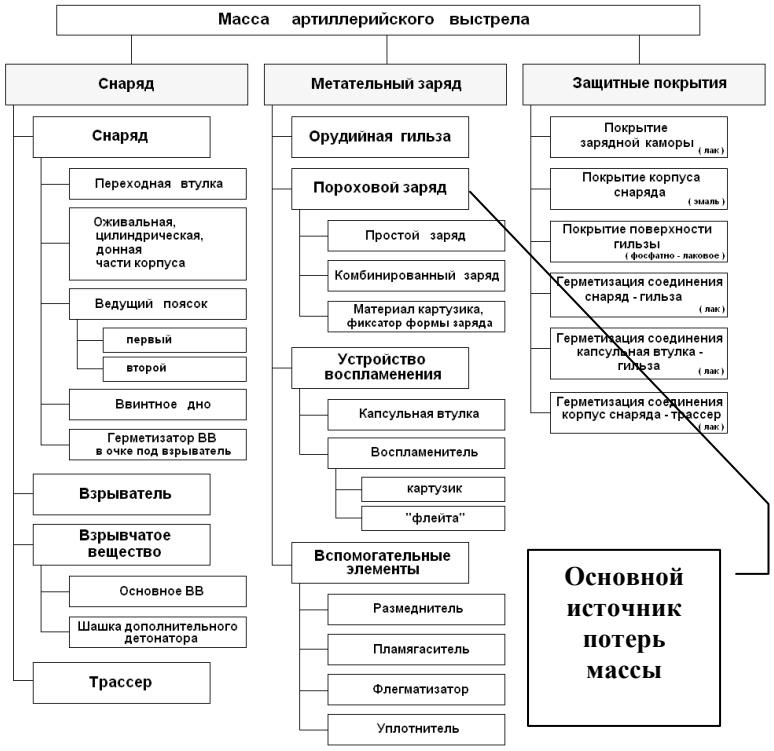

Рисунок 2 – Составляющие массы артиллерийского выстрела

«Во время длительного хранения, скорости протекающих в порохе деструктивных процессов примерно удваиваются на каждые 10 °С после превышения температурного порога равного 30 °С. Большинство порохов, в зависимости от их рецептурного состава в условиях хранения при постоянной температуре 30 °С имеют срок использования равный 15–40 годам. Он возрастет, если температура хранения уменьшится до уровня 10–20 °С, что соответствует умеренному климату. В условиях воздействия высоких температур стабилизатор химической стойкости истощается гораздо быстрее, а вероятность самовозгорания пороха ввиду протекания автокаталитических реакций становится гораздо выше…».

Модели уменьшения срока эксплуатации пороха представлены на рисунке 3. На фрагментах *а*, *б* изображены аксонометрическое изображение поверхностей, характеризующих сокращение срока. По оси X отложены заданные (проектные) временные интервалы хранения порохов – 15–40 лет. Ось Y показывает увеличение температуры в диапазоне 20–90 ^{o}C. Считается, что температура не меняется на всем промежутке хранения. Ось Z характеризует уменьшение срока эксплуатации по критерию химической стойкости относительно первоначального (проектного) значения. Эффект сокращения срока объясняется протеканием реакций разложения (автокатализа) в пороховой массе.

На фрагментах *в*, *г* являются изображение верхних рисунков с использованием способа «семейства» кривых. Отличие фрагментов *в* от *г*, а, следовательно, *а* от *б* заключается в том, что второй из них более «жестко» оценивает уменьшение эксплуатационного срока в окрестностях температуры 30 ^{o}C (кривая больше проседает). Аппроксимация кривых рис. 2 *г* выполненная с использованием полиномов 4-го порядка представлена в таблице 5.

Достоинство приведенных моделей заключается в том, что они показывают динамику сокращения срока службы пороха, однако их недостаток – отсутствие характеристик пороха, подвергающиеся воздействию со стороны автокатализа и которые можно инструментально контролировать. Таким образом, на лицо описание явления с точки зрения его усредненной феноменологии.

Таблица 5 – Полиномиальная аппроксимация модели уменьшения срока эксплуатации

Срок эксплуатации	Коэффициенты полинома вида $Y = p_1 \cdot t^4 + p_2 \cdot t^3 + p_3 \cdot t^2 + p_4 \cdot t + p_5$				
	p_1	p_2	p_3	p_4	p_5
15 лет	-2,1802e-6	0,00048794	-0,034263	0,56994	13,762
20 лет	-2,8291e-6	0,00063219	-0,044181	0,71143	18,853
30 лет	-4,2254e-6	0,00094512	-0,0661	1,0637	28,302
40 лет	-5,6763e-6	0,0012683	-0,088654	1,4317	37,619

Наряду с оценкой фактического срока службы пороха развивается математический аппарат прогноза степени опасности боеприпаса. Так согласно [10–12], в качестве характеристики опасности боеприпаса в

отношении длительного хранения введена оценка вероятности его самовоспламенения (autoignition). В отчетах [11–12] такая характеристика рассчитана для реактивного порохового двигателя неуправляемых реактивных снарядов 155 мм M55. Основу его твердотопливного двигателя составляет двухосновной нитроцеллюлозный порох M28 массой 8700 г, находящийся в камере сгорания в виде шашки. Календарный срок хранения рассматриваемых образцов M55 при расчете не указан, однако можно предположить, что их закладка на хранение произошла в 1963–1968 гг. Из содержания следует о наличии допустимой вероятности самовоспламенения двигателя, однако ее конкретная величина не указана.

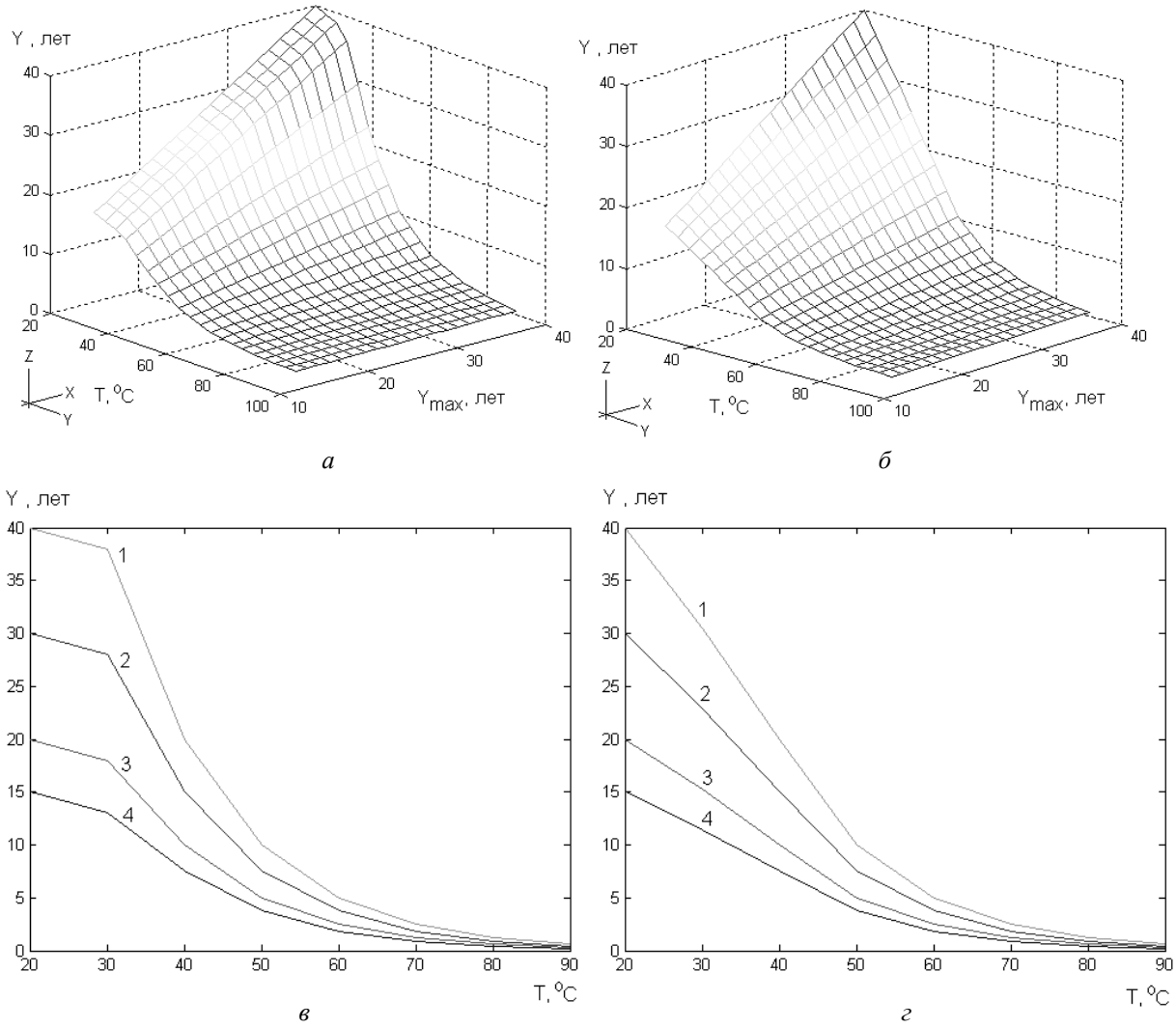

Рисунок 3 – Влияние теплового фактора на уменьшение срока эксплуатации

Таблица 6 – Оптимистичный прогноз вероятностей («оценка сверху») самовоспламенения ракет 155 мм неуправляемых ракет M55 для пяти баз их хранения

Года	Название баз хранения оружия и вероятности самовозгораний (P_{ai}), год$^{-1}$					Среднее значение
	Tooele	Anniston	Umatilla	Pine Bluff	Blue Grass	
2010	$7{,}8\cdot10^{-17}$	$9{,}0\cdot10^{-16}$	$1{,}4\cdot10^{-15}$	$1{,}2\cdot10^{-15}$	$1{,}7\cdot10^{-15}$	$1{,}06\cdot10^{-15}$
2015	$5{,}1\cdot10^{-14}$	$5{,}2\cdot10^{-13}$	$8{,}3\cdot10^{-13}$	$6{,}6\cdot10^{-13}$	$9{,}1\cdot10^{-13}$	$5{,}94\cdot10^{-13}$
2020	$5{,}2\cdot10^{-12}$	$5{,}2\cdot10^{-11}$	$8{,}2\cdot10^{-11}$	$4{,}9\cdot10^{-11}$	$8{,}5\cdot10^{-11}$	$5{,}46\cdot10^{-11}$
2025	$2{,}0\cdot10^{-10}$	$1{,}7\cdot10^{-9}$	$2{,}7\cdot10^{-9}$	$1{,}8\cdot10^{-9}$	$2{,}7\cdot10^{-9}$	$1{,}82\cdot10^{-9}$
2030	$3{,}8\cdot10^{-8}$	$3{,}1\cdot10^{-8}$	$4{,}8\cdot10^{-8}$	$3{,}0\cdot10^{-8}$	$4{,}7\cdot10^{-8}$	$3{,}88\cdot10^{-8}$

Побудительным мотивом к началу работы по исследованию M55, снаряженной химической головной частью было то, что при пожаре БЧ может разгерметизироваться и привести к значительному ущербу. К

тому же саморазогрев порохового двигателя приводит к повышению летучести ее химического агента, что затрудняет эксплуатацию данного вида оружия.

Прогноз самовоспламенения выполнен на временной интервал в 20 лет (2010–2030 гг.) для пяти баз хранения в виде оценок вероятности самовоспламенения боеприпаса за время 1 год. Авторами статьи проведено усреднение данных таблицы 6 и нанесение полученных результатов на полулогарифмическую шкалу (рис. 4). Прогнозная кривая OABC с возрастанием времени увеличивает вероятность реализации самовоспламенения, однако тенденция уменьшения скорости приращения этой вероятности при сроках хранения достигающих на 2015 г. (2015 - 1965 = 50 лет), слишком «оптимистична». Более логичен был бы ее рост по траектории OFTF (где OD рассматривается как ось симметрии) с более быстрым достижением значения $1 \cdot 10^{-6}$, что требует снятия изделия с эксплуатации по показателю безопасности.

Таким образом, на этапе 1998–2010 гг. в зарубежных исследованиях посвященных аспектам долгосрочного и безопасного хранения оружия с учетом его геронтологии все большее внимание уделяется не только качеству перехода боеприпаса в предельное состояние, но и количественной его оценке:

– вводится новая характеристика вероятность самовоспламенения за счет протекания автокаталитических реакций разложения нитроцеллюлозы;

– осознается факт возрастания этой величины со временем, а, следовательно, и опасности;

– вводится понятие о приемлемой вероятности неблагоприятного исхода;

– описываются предпосылки скачкообразного увеличения величины вероятности самовоспламенения.

Однако вопрос адекватности методического аппарата и физики явления саморазогрева пороховой массы остается пока открытым.

Поскольку на современном уровне знаний не представляется возможным устранить причины, приводящие к автокаталитическому разложению нитроцеллюлозы, как основного компонента пироксилинового пороха, то единственными действенными контрмерами, на настоящий момент являются мероприятия по стабилизации его химической стойкости и контроль состояния пороховой массы.

Мероприятия по стабилизации химической стойкости планируется на стадии разработки пороховой рецептуры и реализуется на этапе ее производства. Теория стойкости высокомолекулярных соединений давно вышла за пределы нитроцеллюлозных порохов и на сегодня является самостоятельно развивающимся научным направлением, с которым мы каждодневно встречаемся, например, при покупке пищи. Известна целая группа веществ, широко используемых в качестве стабилизаторов.

Контроль состояния пороховой массы осуществляется после выделки пороха на этапе эксплуатации боеприпаса. Учитывая то, что эксплуатационный этап жизненного цикла этих изделий может длиться 30–50 и более лет, в течении которых боеприпас, как одноразовое невосстанавливаемое изделие ожидает применения по назначению, то построение рациональных систем контроля является важным аспектом решения проблемы, связанной с геронтологией порохового заряда на эксплуатационном этапе его жизненного цикла.

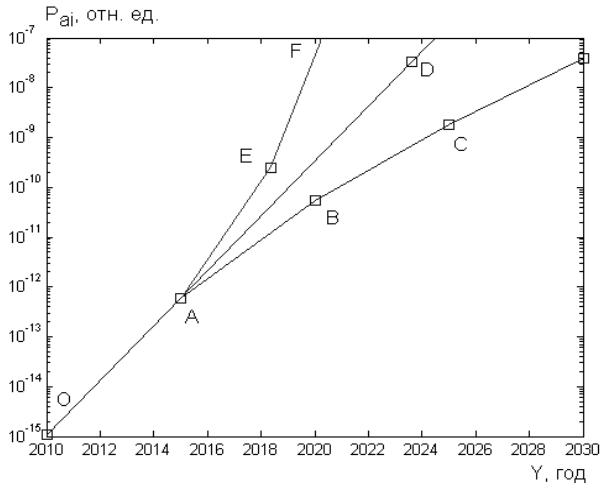

Рисунок 4 – Функции убывания усредненной P_{ai} в зависимости от времени

Успехи аналитического приборостроения, наметившиеся за рубежом в последние 30 лет, привели к разработке и внедрению новых физико-химических методов исследования высокомолекулярных и полимерных соединений, к которым в частности относятся нитроцеллюлозные пороха. Значительная их часть ориентирована на использование в условиях передвижных лабораторий. Только в американском техническом стандарте по ВВ военного предназначения (ТМ 9-1300-214 [13]), который был опубликован в 1984 г., в главе о свойствах и о экспериментальных методах исследования порохов приведены 23 метода их испытаний. Кроме этого продолжают развиваться неконтактные методы контроля пороха на основе ультразвука, рентгеновского сканирования и других методик.

Не раскрывая, подробности каждого из существующих методов отметим, что принципиально все они базируются на трех подходах: термодинамическом, химическом и тепловом.

Термодинамический подход основан на том, что любое тело, поглощая тепло извне, перерабатывая его в себе, должно возвращать часть его обратно в среду не меняя своей структуры. Основу термодина-

мических методов, которые исторически положили начало экспериментальному исследованию свойств порохов, являются процедуры контролируемого нагрева и слежения за изменением состояния пороха.

Химический подход основан на аксиоме постоянства химического состава. Любое отступление от этого правила является сигналом начала необратимых процессов в пороховой массе. Успехи аналитической химии и химии полимеров обогатили их арсенал высокочувствительными инструментами обнаружения течения автокаталитических реакций.

Одним из современных быстроразвивающихся методов химического анализа порохов является высокоэффективная жидкостная хроматография (ВЭЖХ). Ее англоязычным эквивалентом является термин «high performance liquid chromatography» (HPLC). ВЭЖХ на сегодня является наиболее совершенным методом разделения сложных смесей веществ, каким и является пороховая масса. Общий вид современного прибора жидкостной хромотографии представлен рис. 5 *а.*

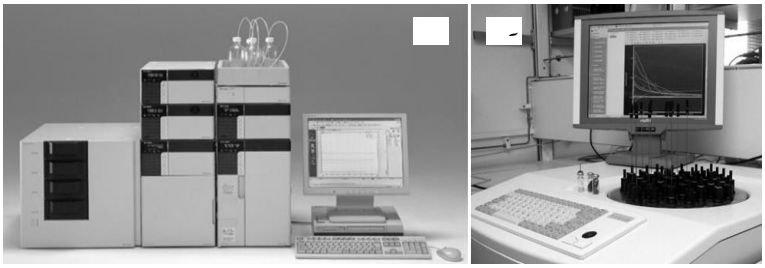

Рисунок 5 – Общий вид современных приборов жидкостной хромотографии (*а*) и калориметрии (*б*)

Тепловой подход представляет собой разновидность термохимических представлений. Протекание экзотермических химических реакций в толще пороховой массы делают ее источником тепловой энергии, интенсивность выделения которой фиксируется калориметрами. В работе [15] приведен диапазон изменения массовой плотности теплового потока, который равен 500–5000 мкВт/г. На рис. 5 б изображен калориметрическая пороховая станция 3206 фирмы Bodvcote CMK Materials testing [14]. Ее диапазон измерений соответствует величине 5 мкВт – 60 мВт.

Зарубежная практика контроля пороха опирается на совокупность нескольких методов экспериментальны исследований пороха, например комплекс средств BoMic II Bodycote CMK использует ВЭЖХ и микрокаллориметрию. В работах Франхоферского института химической технологии (ФРГ) [15], посвященных способам оценки срока службы пороха приводится иная совокупность экспериментальных методов исследования (табл. 7):

Таблица 7 – Методы экспериментальных исследований физико-химического состава пороха

№/№	Характеристика порохового материала	Способ определения
1	Средняя молярная масса	гель хроматография
2	Уровень стабилизатора химической стойкости	ВЭЖХ
3	Содержание вещества антиоксиданта	ВЭЖХ
4	Содержание пластифицирующих веществ	ВЭЖХ
5	Содержание веществ контролирующих процесс горения	ВЭЖХ
6	Падение массы вещества	взвешивание
7	Генерация газа	газовый контроль
8	Генерация тепла	микрокалориметрия
9	Контроль теплоты взрывчатого превращения (калорийности)	калориметрическая бомба
10	Эластичность	динамический анализ материала

Таким образом, в отношении нитроцеллюлозных артиллерийских порохов можно говорить о постепенном переходе от контроля за одним параметром к контролю их совокупности, которые уже рассматриваются системно в их взаимосвязи. Помимо наблюдений за динамикой изменения выбранной совокупности характеристик, их объединяют в виртуальное «состояние» пороха. Такое объединение информации происходит на базе заранее разработанной математической модели порохового заряда как физического объекта, которые являются «ноу-хау» того или иного производителя. Далее на основе систематических наблюдений, и при наличии модели переходят к более сложной операции – прогнозу изменения

«состояния» порохового заряда на перспективу. Такая трехступенчатая система получила название системы мониторинга состояния.

В отечественной практике эксплуатации боеприпасов и средств поражения имеются определенные отставания. Несмотря на ряд техногенных катастроф, произошедших в Украине в течение последнего десятилетия, системных исследований направленных на установление параметров трансформаций состояния боеприпасов и средств поражения при их старении не ведется. Имеют место отдельные работы, посвященные изменению свойств танковых артиллерийских боеприпасов и боеприпасов к стрелковому оружию [17].

Развитие методов оценки физического состояния пороховых зарядов к ствольным системам при совокупном действии на них фактора «климат-время»; оценка степени их опасности; а также интенсивность внедрения передовых методик контроля адекватны современному состоянию отечественных баз и складов.

С учетом того, что геронтологические изменения пороховых зарядов трансформируют внутрибаллистические параметры, практически важным представляется решение задачи об определении степени влияния этих модификаций состояния на боевые, технические и эксплуатационные свойства ствольных систем. Эта задача приобретает особую важность применительно к корабельным артиллерийским комплексам ввиду специфических условий, складывающихся при нахождении надводного корабля в автономном плавании. К ним следует отнести: ограниченные ресурсы на корабле, в том числе по боекомплекту и совместному нахождению артиллерийского и минно-торпедного боезапаса в рамках надводного корабля как носителя оружия.

Критически подходя к иностранному опыту мониторинга состояния боеприпасов и средств поражения, в частности к мониторингу пороховых зарядов, следует отметить то, что западными аналитиками сделана ставка на высокоточные методы жидкостной хроматографии и калориметрии с последующим сравнительным причинно-следственным анализом их результатов. В этой связи важными является учет еще одного аспекта. С точки зрения методологии западный подход добиваясь высокой точности определения текущего состояния химической стойкости (стоимость боевого корабля – носителя оружия возросла 5 и более раз, объем носимого боезапаса также увеличивается), платит за это повышенной удельной стоимостью цикла измерений и относительно низкой удельной пропускной способностью лаборатории (один анализ длится 20 и более суток). К тому же, совокупность методов выбранных в качестве базовых, не позволяет ничего определенного сказать о втором аспекте стойкости – баллистической. Это происходит ввиду того, что выбранные параметры контроля (дифениламин и его нитропроизводные) не являются энергетическими компонентами, и на их основе нельзя выявить связь «новое физико-химическое состояние» – «измененный баллистический эффект». Категории химической нестабильности артиллерийских порохов по стандартам принятым в США представлены в таблице 8 [4].

Таблица 8 – Категорий химической нестабильности артиллерийских пороха по стандартам, принятым в США

Категория	Процент стабилизатора	Характер потерь стабилизатора	Степень опасность пороха
A	более 0,45 %	незначительная потеря стабилизатора	порох безопасен для длительного хранения
B	от 0,45 до 0,3 %	приемлемая потеря стабилизатора	порох безопасен для длительного хранения
C	от 0,3 % до 0,2 %	существенная потеря стабилизатора	порох не представляет непосредственной опасности, но приближается к потенциально опасному состоянию нестабильности
D	менее 0,2 %	недопустимо высокая потеря стабилизатора	порох представляют потенциальную опасность и недопустим к длительному хранению

Здесь хочется привести один из известных примеров установления такой связи – так называемая формула испытательной комиссии Охтенского порохового завода (ИКОПЗ), которая с точки зрения пороховой геронтологии интересна тем, что учитывают величину δH % – процентное содержание летучих веществ в пороховой массе [17], о чем в частности говорится в американском стандарте «Ordnance pamphlet – 4» [6]:

$$\frac{\delta p_{\max}}{p_{\max}} = 2\frac{\delta\omega}{\omega} - \frac{4}{3}\frac{\delta W_0}{W_0} + \frac{3}{4}\frac{\delta q}{q} - \frac{4}{3}\frac{\delta e_1}{e_1} - 0{,}15\delta H\% + 0{,}0036\delta\, t^o,$$

$$\frac{\delta V_o}{V_o} = \frac{3}{4}\frac{\delta\omega}{\omega} - \frac{1}{3}\frac{\delta W_0}{W_0} - \frac{2}{5}\frac{\delta q}{q} - \frac{1}{3}\frac{\delta e_1}{e_1} - 0{,}04\delta H\% + 0{,}0011\delta\, t^o.$$

Малоразвитость экспериментальной базы аналитического приборостроения на рубеже 1890–1920 гг. не давала возможности определить δH с необходимой точностью и оперативностью, что не позволило формуле ИКОПЗ стать действенным инструментом в войсках, а ограничило ее статус уровнем академического изучения внутрибаллистических процессов. Однако сегодня положение изменилось и для объединенного рассмотрения физико-химической и баллистической стабильности пороха сложились благоприятные условия.

Литература

1. Dale G.F. Stability of nitrocellulose based powder. Warship international. XVII №4. 1980. – p. 23–28.
2. Российский императорский флот. – СПб: Издательское товарищество И.Д. Сытина. 1915, – 230 с.
3. The threat from explosive events in ammunition storage areas. Электронный интернет ресурс – http://www.iansa.org/un/documents/ExplosiveEvents1995–2009.pdf.
4. Propellant management guide. Logistics review and technical assistance office. U.S. Army industrial operations command. Rock Island. 1998. – 46 p.
5. Wilson J. A. A new approach for service life evaluation of gun propellant. Naval surface warfare center. Crane division. 1998. – 10 p.
6. Ordnance pamphlet – 4. Ammunition. Instruction for the naval service. 1943. – 190 p.
7. Vogelsanger B., Ossola B., Schadeli U., Antenen D., Ryf K. Ballistic shelf life of propellants for medium and small calibre ammunition – influence of deterrent diffusion and nitrocellulose degradation. 19th International Symposium of Ballistics, 7-11 May 2001, Interlaken, Switzerland. 41-48 p.
8. Burnham A. K., Fried L. E. Kinetics of PBX9404 aging. UCRL-CONF-224391. 7th aging, compatibility and stockpile stewardship conference. Los Alamos, NM, USA. September 26, 2006 – September 28, 2006. – 6 p.
9. Surveillance and in-service proof. International ammunition technical guideline. IATG 07.20. First edition. 2011. – 26 p.
10. Effects of degraded agent and munitions anomalies on chemical stockpile disposal operations. Washington, DC: The National Academies Press, 2004. – 66 p.
11. US Army. Preparation and analysis of M55 leaker rocket propellant samples. Final test report. Aberdeen proving ground. Md.: Program manager for chemical demilitarization. 2002.
12. US Army. M55 rocket assessment. Summary report. Aberdeen proving ground. Md.: Program manager for chemical demilitarization. 2002.
13. Military Explosives. TM 9-1300-214.
14. Combined microcalorimetric/HPLC system for surveillance testing of propellants. Bodvcote CMK Materials testing.
15. Bohn. M.A. Methods and kinetic models for the lifetime assessment of solid propellants. 87th Symposium of the propulsion and energetics panel of AGARD, Athens, Greece, 1996. Conference proceedings 586.
16. Анипко О.Б., Гончаренко П.Д., Хайков В.Л. Преждевременные разрывы снарядов корабельной артиллерии и методы их предупреждения. Зарубежный опыт. // Збірник наукових праць Академії військово-морських сил имени П.С. Нахимова. – 2011. – №4(48). – С. 6–16.
17. Анипко О.Б., Бусяк Ю.М. Внутренняя баллистика ствольных систем при применении боеприпасов длительных сроков хранения. – Харьков.: Изд-во академии внутр. войск МВД Украины, 2010. – 130 с.

УДК 623.451.4

Анипко О.Б., Хайков В.Л.

АНАЛІЗ МЕТОДІВ ОЦІНКИ СТАНУ ПОРОХОВИХ ЗАРЯДІВ ЯК ЕЛЕМЕНТ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ АРТИЛЕРІЙСЬКИХ БОЄПРИПАСІВ

Розглядаються методи оцінки стану порохових зарядів, що дозволяють враховувати зміну бойового ефекту, безпеки стрільби та безпеки зберігання боєприпасів.

Anipko O.B., Khaykov V.L.

METHODS ANALYSIS FOR ASSESSMENT OF PROPELLANT CHARGES AS A PART OF THE ARTILLERY AMMUNITION MONITORING SYSTEM

The methods of propellant charges assessment, which allow to take into account changes in their performance, fire safety and safe storage of ammunition, discussed.