

**ЭКСПРЕСС ПЛОТНОМЕТРИЯ МЕТАТЕЛЬНЫХ ЗАРЯДОВ КОРАБЕЛЬНЫХ
Артиллерийских боеприпасов**

В современных метательных зарядах артиллерийских боеприпасов корабельной артиллерии используются пороха гранулированного вида. Гранулы (пороховые элементы – ПЭ) при помощи средств уплотнения плотно прилегают друг к другу и к стенкам гильзы (картуза) и не перераспределяются. В зависимости от индекса боеприпаса метательный заряд может состоять из ПЭ одной или разной форм и размеров. Однако преобладающей конфигурацией ПЭ является цилиндр с одним или семью каналами.

В процессе эксплуатации (хранения, транспортировки, погрузочно-разгрузочных операций, технического обслуживания, ремонта) ПЭ могут перемещаться внутри гильзы, тереться и соударяться друг с другом, подвергаться действию внешних факторов физико-химико-биологической природы (изменению температуры, влажности, воздействию силы гравитации, поражению микроорганизмами) и следовательно, трескаться (ломаться), истираться, набухать (давать усадку), терять летучие компоненты, то есть в той или иной мере видоизменять свои первичные геометрические размеры и плотность. В своем модифицированном состоянии они находятся в заряде в виде совокупности ПЭ и так называемой пороховой пыли различной степени дисперсности.

Наиболее близким физическим аналогом такого состояния пороха является его отождествление с сыпучим материалом (СМ), то есть гетерогенной системой с двумя фракциями в твердой фазе (крупно и мелкодисперсной) распределенной в газо-воздушной среде [1]. Общеизвестно, что химический состав ПЭ влияет на возможность дальнейшей эксплуатации артиллерийского выстрела, аналогично физические свойства отдельных ПЭ определяют качество всего метательного заряда. Так, например, такие особенности пороховых элементов как слеживаемость и поглощение влаги, относящиеся к признакам СМ, приводят к затруднению процесса воспламенения метательного заряда. Таким образом, порох как СМ характеризуется рядом показателей, из которых наиболее информативным и доступным измерению является плотность. Плотность пороха зависит от влажности, величины и формы пороховых элементов, количественного соотношения пыли и ПЭ, степени развития пор на поверхности последних. Плотность пороха по количеству явлений, которые связаны с ней причинно-следственными связями (рис. 1) уступает только его химическому составу. Вследствие этого входной экспресс-контроль плотности порохового заряда позволит более объективно устанавливать техническое состояние артвыстрела и даст возможность рационально управлять расходом ресурса ствола корабельной артиллерийской установки (КАУ) путем ограничения (исключения) перегрузок ствола-моноблока выстрелами сопровождаемыми максимальными давлениями, превышающими установленные пределы. Таким образом, к стрельбе следует не допускать боеприпасы, способные вызвать вышеописанный эффект. Теоретическими предпосылками реализуемости такого дополнительного входного контроля является периодический неразрушающий контроль плотности метательного заряда.

Ввиду ранее принятого отождествления порохового заряда с СМ, используя результаты исследований [1], расширим понятийный аппарат плотности заряда и методов установления его количественного значения.

ПЭ цилиндрического семиканального пороха (рис. 2 а, б) характеризуется потенциальным наличием как закрытых пор (область А) так и открытых каналов (области В). Пороховой заряд сформированный с таких ПЭ имеет газо-воздушные микропространства между ними и частицами пороховой пыли (область С). Последнюю можно подразделять по степени дисперсности и форме крупиц (рис. 2, б). На рис. 3 приведена совокупность характеристик плотности порохового заряда с учетом влияния газовой фазы.

Объемная плотность пороха – масса единицы объема порохового заряда свободно насыпанного в гильзу (картуз) непосредственно после ее заполнения без уплотнения. Данный вид плотности является характеристикой уплотняемости гранулированных порохов. После уплотнения методом встряхивания или прессования промежуточное пространство между ПЭ заполненное воздухом уменьшается. Величине объемной плотности пороха во внутренней баллистике можно поставить в соответствие плотность заряжания.

При измерении плотности ПЭ следует различать истинную и кажущуюся плотность. Истинная плотность ПЭ определяется без учёта внутренних пустот и каналов. Кажущуюся плотность ПЭ рассчитывается как отношение массы ПЭ ко всему занимаемому им объёму. Таким образом, истинная и кажущиеся плотности отличаются друг от друга на величину порозности, то есть доли объёма пустот в занимаемом объёме. Под микропорами будем понимать поры на поверхности и внутри ПЭ. Макропоры – свободные

полости между ПЭ в гильзе (картузе) заполненные газовой смесью. При решении основной задачи внутренней баллистики в качестве плотности пороха подразумевают истинную плотность равную $1,6 \text{ г/см}^3$.

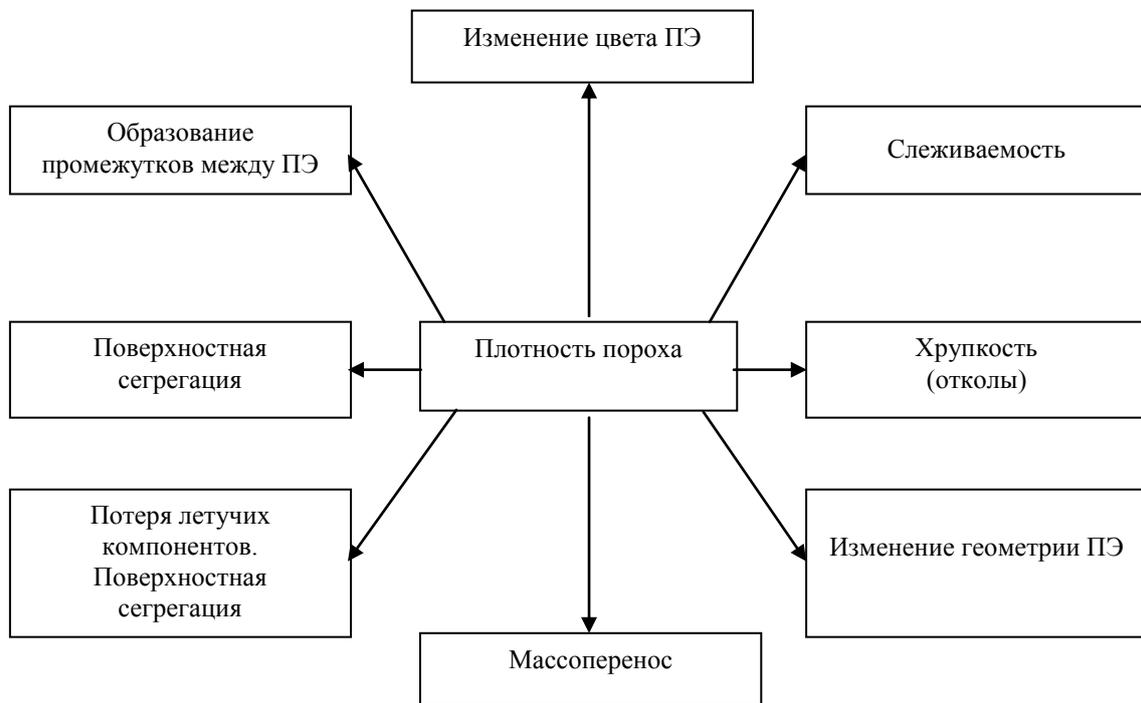


Рисунок 1 – Плотность пороха и явления связанные с ней

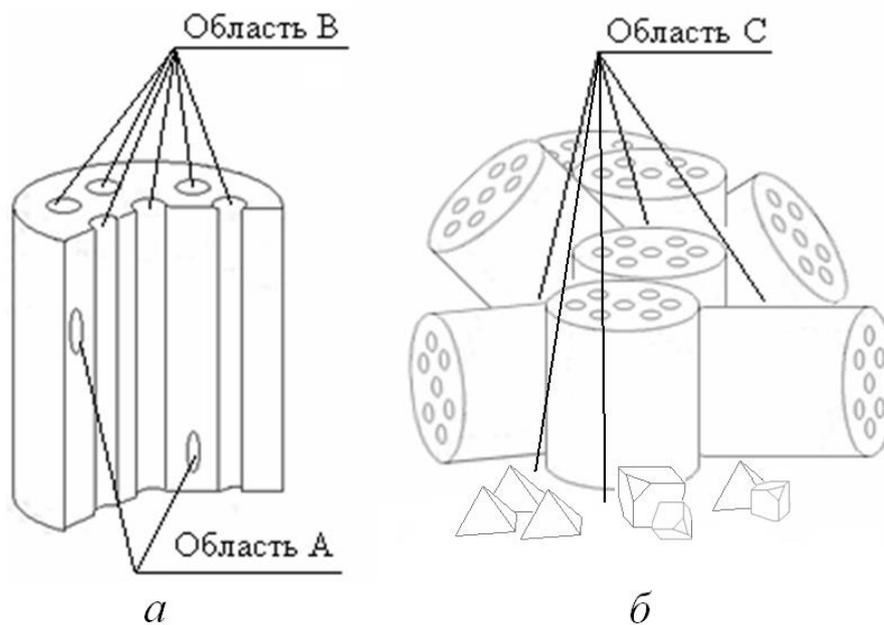


Рисунок 2 – Пороховой заряд как сыпучий материал:
a – поры и каналы порохового элемента; *б* – поры внутри порохового заряда



Рисунок 3 – Виды плотностей порохового заряда

Метательные заряды корабельной артиллерии. Основой метательных зарядов артиллерийских выстрелов корабельной артиллерии ВМС Украины являются пироксилиновые высокоазотистые пороха.

Масса порохового заряда артвыстрелов колеблется в пределах 97–5350 г (табл. 1,2). Заряды калибров 25–57 мм являются простыми, так как состоят из навесок бездымного пороха одной марки (простой пороховой заряд). Пороховые заряды для КАУ АК-176 и АК-100 являются комбинированными, так как в их состав входят пороха трех и четыре марок соответственно.

Распределение масс пороха в комбинированных пороховых зарядах представлено на круговых гистограммах рис. 4.

Навески семиканальных пироксилиново-канифольные порохов 13/7 БП, 9/7 БП в комбинированных зарядах составляют 75 и 87 % общей массы. Массы связанных пучков трубчатого пороха 17/1 тр БП, 12/1 тр БП соотносятся к общей массе бездымного пороха как 18,7 и 7,4 %. Соотношение масс трубчатых и семиканальных порохов в 76-мм и 100-мм выстрелах не одинаковое: для 76-мм – 1 к 12 (1 часть массы трубчатого пороха к 12 массам семиканального); для 100-мм – 1 к 4. Массовый баланс пламегасящего пороха УГФ-1 в виде цилиндрических трубок примерно одинаков для артвыстрелов этих двух КАУ (5,6–5,7 %). Он составляет 200 г для АК-176 и 300 г для АК-100. Особенностью комбинированного заряда АК-100 является использование пороха типа 5/IX-20, относящегося к пироксилиновым пламегасящим порохам содержащим пламегасительную добавку 20% хлорорганического соединения – дихлордифенилтрихлорэтан ($C_{14}H_9Cl_5$), более известного по его сокращению ДДТ (ДихлорДифенилТрихлорэтан) или бытовому названию – дуст. ДДТ является бесцветным кристаллическим веществом и одним из экологически опасных инсектицидов. В порохе данного вида ДДТ играет двойную роль пламегасящей добавки и защиты от возможного биологического воздействия.

Используя метод относительных масс определим основные соотношения составных частей метательных зарядов выбранных КАУ. Массу метательного заряда представим в виде следующей суммы:

$$\omega_{МЗ} = \omega_{ПЗ} + \omega_{В} + \omega_{ФЛ},$$

где $\omega_{МЗ}$ – масса метательного заряда, г; $\omega_{ПЗ}$ – масса порохового заряда (бездымный порох), г; $\omega_{В}$ – масса воспламенителя, г; $\omega_{ФЛ}$ – масса флегматизатора, г.

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ПРОМИСЛОВОГО ОБЛАДНАННЯ

Таблица 1 – Основные характеристики метательных зарядов корабельной артиллерии

Тип АУ	Марки бездымных порохов в метательном заряде	Средние массы бездымного пороха в заряде, г	Общая масса бездымных порохов в заряде, г	Тип воспламенителя	Масса воспламенителя, г	Тип флегматизатора	Масса флегматизатора, г
Комбинированный пороховой заряд							
АК-100	13/7 БП	4000 (74,8 %)	5350	ДРП-2	75	ФР-58	100
	17/1 тр БП	1000 (18,7 %)					
	УГФ-1	300 (5,6 %)					
	5/IX-20	50 (0,9 %)					
АК-176	9/7 БП	2340 (86,9 %)	2690	ДРП-1	25	ФЛ-76	50
	12/1 тр БП	200 (7,4 %)					
	УГФ-1	150 (5,7 %)					
Простой пороховой заряд							
АК-725	11/7 БП гр	1190 (100 %)	1190	ДРП-1	7	Ф-281	33
АК-230	6/7 БП гр	190 (100 %)	190	–	–	–	–
АК-630	6/7 фл	118 (100 %)	118	–	–	–	–
2М-3М	6/7 гр	94,5 (100 %)	94,5	ДРП-1	2,5	–	–

Таблица 2 – Дополнительные характеристики метательных зарядов корабельной артиллерии

Тип АУ	Размеднитель – свинцовая проволока, г	Наличие трассера	Тип устройства воспламенения	Тип флегматизатора	Тип гильз
АК-100	25	–	УВ-4	ФР-58	Г58
АК-176	30	–	УВ-4	ФЛ-76	Г62С
АК-725	12-15	Для всех № 8	КВ-5	Ф-281	Г281, Г281Т
АК-230	3	Только для УБР-83	ЭКВ-2М	–	Г83
АК-630	1	Только для УОР-84	ЭКВ-30М	–	Г84
2М-3М	2	Для всех	ЗТ укороченная	–	Г85, Г85С

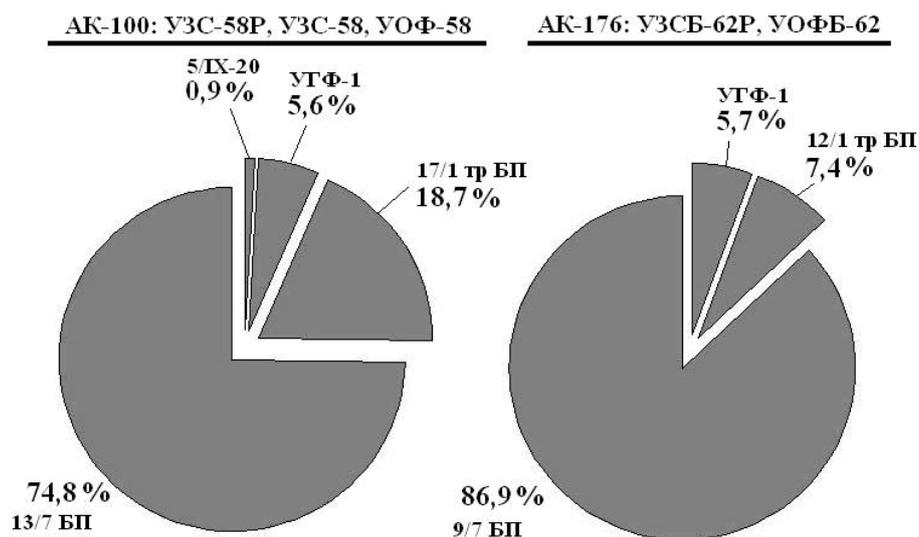


Рисунок 4 – Процентные соотношения порохов в комбинированных зарядах

Результаты расчетов представлены в таблице 3.

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ПРОМИСЛОВОГО ОБЛАДНАННЯ

Таблица 3 – Соотношения масс различных частей метательного заряда для выстрелов КАУ

Тип АУ	Средние массы метательного заряда, г	Средние массы бездымного пороха в заряде, г	Отношение $\omega_{ПЗ} / \omega_{МЗ}$, %	Масса воспламенителя, г	Отношение $\omega_B / \omega_{МЗ}$, %	Масса флегматизатора, г	Отношение $\omega_{ФЛ} / \omega_{МЗ}$, %
Комбинированный пороховой заряд							
АК-100	5525	5350	96,8	75	1,4	100	1,8
АК-176	2765	2690	97,3	25	0,9	50	1,8
Простой пороховой заряд							
АК-725	1230	1190	96,7	7	0,6	33	2,7
АК-230	190	190	100	–	–	–	–
АК-630	118	118	100	–	–	–	–
2М-3М	97	94,5	97,4	2,5	2,6	–	–

Примечание: в боеприпасах к АК-230, АК-630 воспламенитель на основе дымного пороха не используется, а в боеприпасах к 2М-3М, АК-230, АК-630 нет флегматизатора.

Анализ данных табл. 3 показывает, что относительные массы пороховых зарядов для разных КАУ хорошо согласуются друг с другом. Например, относительная масса порохового заряда бездымного пороха для всех 14-ти эксплуатируемых выстрелов КАУ составляет $\approx 97\%$ общей массы метательного заряда. Среднее отношение масс воспламенителя и флегматизатора – $0,97\%$ и $2,1\%$ соответственно.

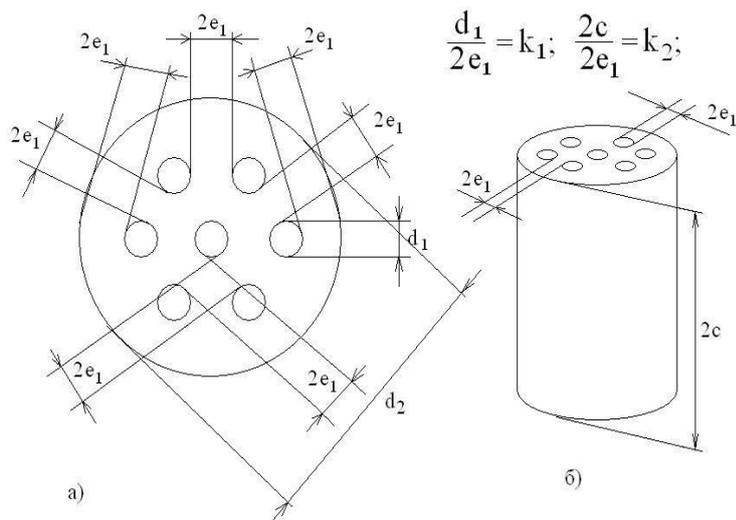


Рисунок 5 – Геометрические соотношения семиканального ПЭ

соотношения в форме ПЭ этого вида представлены на рис. 6 б. Коэффициенты формы для трубчатого пороха $k_1 = 1-5$; $k_2 = 100-300$. Геометрия трубчатого пороха представлена в табл. 5

Таблица 4 – Геометрия ПЭ семиканального пороха ($k_1 = 0,5$; $k_2 = 12$)

$2e_1$, мм	$d_1 = 0,5 \times 2e_1$, мм	$2c = 12 \times 2e_1$, мм	$d_2 = 3 \times 2e_1 + 3 \times d_1$, мм
1,2	0,45	10,8	4,95
1,7	0,65	15,6	7,05

Таблица 5 – Геометрия трубчатого пороха ($k_1 = 1$; $k_2 = 300$)

$2e_1$, мм	$d_1 = 1 \times 2e_1$, мм	$2c = 300 \times 2e_1$, мм	$d_2 = 2 \times 2e_1 + d_1$, мм
1,2	1,2	360	3,6
1,7	1,7	510	5,1

Цилиндрические одноканальные пороха относятся к еще одной форме ПЭ, используемых в метательных зарядах выстрелов КАУ (рис. 6 а). Коэффициенты формы для этих ПЭ имеют следующее значения: $k_1 = 0,5-1$; $k_2 = 5-10$, их геометрия представлена в табл. 6.

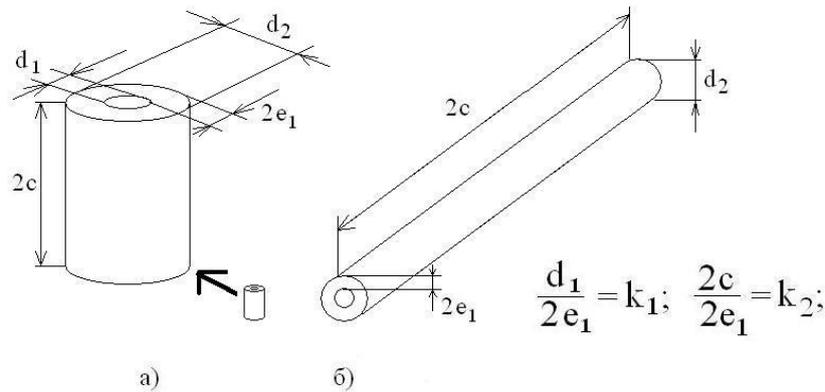


Рисунок 6 – Геометрические соотношения одноканального ПЭ

Таблица 6 – Геометрия ПЭ одноканального пороха ($k_1 = 0,5$; $k_2 = 5$)

$2e_1$, мм	$d_1 = 0,5 \times 2e_1$, мм	$2c = 5 \times 2e_1$, мм	$d_2 = 2 \times 2e_1 + d_1$, мм
1,2	0,6	7,5	3
1,7	0,85	8,5	4,25

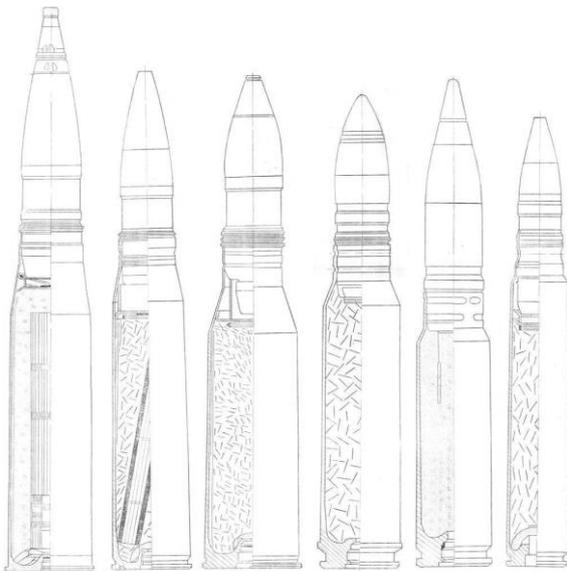


Рисунок 7 – Компонировка метательных зарядов боеприпасов КАУ

Компоновочные схемы метательных зарядов КАУ представлены на рис. 7 слева – направо: 100-мм, 76-мм, 57-мм, 30-мм, 30-мм, 25-мм [4]. Маштабы на рисунке не соблюдались ввиду улучшения детализации составных элементов. Уплотненная пороховая навеска выстрелов калибров 25–57 мм состоит из пороха одной марки. В выстрелах калибра 76-мм и выше используется комбинированный заряд. Выстрелы АК-176 имеют наклонно расположенный связанный пучок трубчатого пороха, а пучок трубок для выстрелов АК-100 характеризуется центрально-осевым расположением. Семиканальные ПЭ в выстрелах 76-мм и 100-мм расположены вокруг трубчатых и также представляют собой уплотненную засыпку. Пороховой пламегаситель – порох УГФ-1 и 5/IX-20 (только для АК-100) находится также вокруг и смешан с семиканальными ПЭ. Для каждой партии зарядов значения навесок порохов марок 13/7 БП, 17/1 тр БП, УГФ-1, 5/IX-20 (для АК-100) и 9/7 БП, 12/1 тр БП, УГФ-1 (для АК-176) соответствуют массам, установленным при приемных испытаниях той или иной партии и может отличаться от средних значений табл. 3.

Методы плотнометрии метательных зарядов. Основой современных методов измерения плотности пороха являются прямое и косвенное ее определение. К первым относится объемно-весовой метод, при котором масса и объем измеряются напрямую, а искомая плотность определяется их отношением. Однако ввиду наличия в ПЭ внутренних каналов объемно-весовой метод дает значительные погрешности для семиканальных порохов. К косвенным методам относятся механические, пикнометрические, ультразвуковой и радиационный [1] (рис. 8).

Практическая реализация механического метода требует сложного под час уникального, специально изготовленного для тех или иных задач лабораторного оборудования и высокой квалификации лиц проводящих измерения.



Рисунок 8 – Косвенные методы измерения плотности пороха

Пикнометрическое измерение плотности пороха основано на вытеснении объема газа из ПЭ и замещение его ртутью. Это вещество при атмосферном давлении не проникает в поры ПЭ с раскрывом менее 15 микрометров. Измеряя массу камеры с ПЭ с ртутью и без нее, при априорном значении плотности ртути, массы ПЭ равна разнице объема ртути в камере с ПЭ и без него. Разница в объеме ртути является объемом ПЭ. Таким образом, жидкостная пикнометрия связана с применением такого токсичного компонента как ртуть и при значительном количестве измерений может привести к появлению загрязненных ртутью отходов. При проведении газовой пикнометрии на основе гелия необходима тщательная калибровка аппаратуры и недопущение утечек газа.

Действие ультразвукового плотнометра основано на зависимости скорости звука в ПЭ от плотности среды. Ввиду наличия развитой сети воздушных внутренних каналов как в самом пороховом элементе, так и в метательном заряде данный метод применительно к семиканальным порохам и комбинированным зарядам не отвечает требованиям по точности. Погружение пороха в среду хорошо проводящую ультразвук,

например деминерализированную воду приведет к ее проникания в поры и изменению плотности под воздействием растворителя. Окружение ПЭ гелеподобными веществами также не решает задачи ввиду того, что разные слой геля имеют неодинаковую плотность. Таким образом, реализация ультразвукового метода измерения плотности наталкивается на задачи изготовления препарата заданного качества, что требует высокой квалификации персонала, значительного времени и поэтому исключает ультразвуковой метод из списка экспрессных в данном его приложении.

В основе радиометрического метода измерения плотности лежит способность пороховой массы ослаблять интенсивность ионизирующего излучения. Недостатком метода при измерении плотности пороха являются малые размеры ПЭ, что требует специальных радиоизотопных источников ионизирующего гамма (бета) излучения и чувствительной радиометрической аппаратуры.

Вычислительная томография – метод неразрушающего послойного исследования внутренней структуры как отдельного ПЭ, так и всего порохового заряда посредством многократного просвечивания в различных пересекающихся направлениях. Из всех шести выше перечисленных методов плотнометрии томография является самым дорогостоящим по стоимости аппаратуры, ее амортизации при проведении исследований, но вместе с этим обладает одним уникальным свойством – возможностью получения распределения плотности внутри ПЭ в так называемой рентгеновской плотности, выраженной числами Хаунсфилда:

$$\frac{\mu_x - \mu_{water}}{\mu_{water} - \mu_{air}} \times 1000,$$

где μ_{water} и μ_{air} – линейные коэффициенты ослабления для воды и воздуха при стандартных условиях, см⁻¹.

Ввиду широкого распространения рентгеновской компьютерной томографии (РКТ) в медицинской диагностике значения чисел Хаунсфилда для тканей биологических объектов хорошо изучены (табл. 7)

Таблица 7 – Значения чисел Хаунсфилда для тканей биологических объектов

Вещество	Рентгеновская плотность в числах Хаунсфилда
Воздух	-1000
Жировая ткань	-120
Вода	0
Мягкие ткани	+40
Костные ткани	+400 и выше

РКТ исследования пироксилиновых артиллерийских порохов и связанные с этим задачи локализации их внутренних дефектов в технической литературе описаны не достаточно широко. Такое состояние вопроса можно объяснить относительной новизной использования метода РКТ в интересах военного дела. Анализ доступной литературы также показал то, что РКТ уже используется в интересах дефектоскопии ракетных двигателей твердого топлива для поиска и обнаружения неоднородностей «заливки» твердого ракетного топлива [3–5].

Экспресс плотнометрия с использованием РКТ. Ввиду недоступности промышленных томографов плотнометрические исследования были проведены на медицинском приборе с техническими характеристиками приведенными в таблице 8.

Исходными данными для определения распределения плотностных характеристик внутри ПЭ пироксилинового семиканального пороха марки 12/7 БП являлись реконструированные томографические срезы.

Таблица 8 – Технические характеристики медицинского томографа

Характеристика прибора	Значение
<i>Бесконтрастная КТ (аксиальное сканирование)</i>	
Время оборота	2 сек
Скорость вращения гентри	30 об/мин
Обычный диапазон сканирования	25 см
Время сканирования	2 сек
Толщина среза	3,0 мм
Время воспроизведения изображения	1 сек/изобр
<i>Формирование рентгеновского излучения</i>	
Характеристика прибора	Значение
Форма луча	коническая
Напряжение рентгеновской трубки	120 кВ
Ток рентгеновской трубки	0.75мА
Размер фокусного пятна	1 мм x 1 мм
<i>Обработка данных</i>	
Матрица реконструкции	512 x 512
Размер элемента изображения	0,49 мм
<i>Качество изображений</i>	
Нормальный уровень шума меньше	0,3%
<i>Поле обзора</i>	
Тип детекторов	твердотельный
Основные детекторы	408x8 рядов
<i>Геометрические размеры</i>	
Апертура	32 см

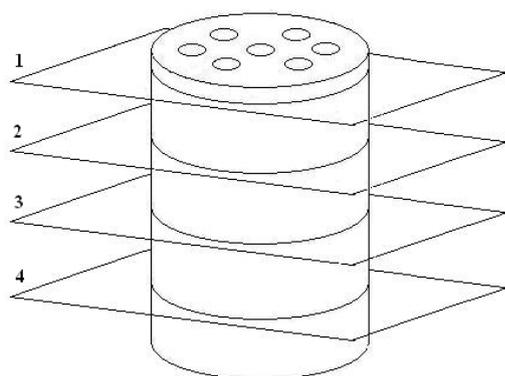


Рисунок 9 – Схема РКТ срезов ПЭ

ПЭ элемент был сканирован в аксиальной плоскости с шагом 3 мм (рис. 9), при этом получено в среднем 5–6 сечений. Первое и последние сечения имеют размытое изображение ввиду того, что ПЭ был расположен не точно вдоль оси стола гентри. В результате наблюдался краевой эффект (частичный захват воздушной поверхности).

Реконструированное томографическое изображение в сечении №1 представлено на рис. 10. При увеличении плотности материала цвет пикселей принимает более яркий оттенок серого цвета.

Уменьшение плотности в приповерхностном слое иллюстрирует увеличенное в 1,5 раз фото левого верхнего края ПЭ (левый верхний часть рис. 10). Дополнительным косвенным подтверждением этого факта являются результаты оптических исследований. Торец этого же ПЭ был отсканирован на планшетном сканере. Полученное фото было подвергнуто цветиметрическому анализу. Торец ПЭ

имел коричневый цвет с цветовыми тонами от светло до темно-коричневого. Переход тона наблюдался в направлении от края к центру торцевой поверхности. Более яркие тона коричневого фиксировались по краям порохового элемента и у его семи сквозных каналов. Имевший место эффект был интерпретирован как увеличение количества пор по краю и вблизи каналов, что обусловило большую световую проницаемость пороховой массы в данных местах.

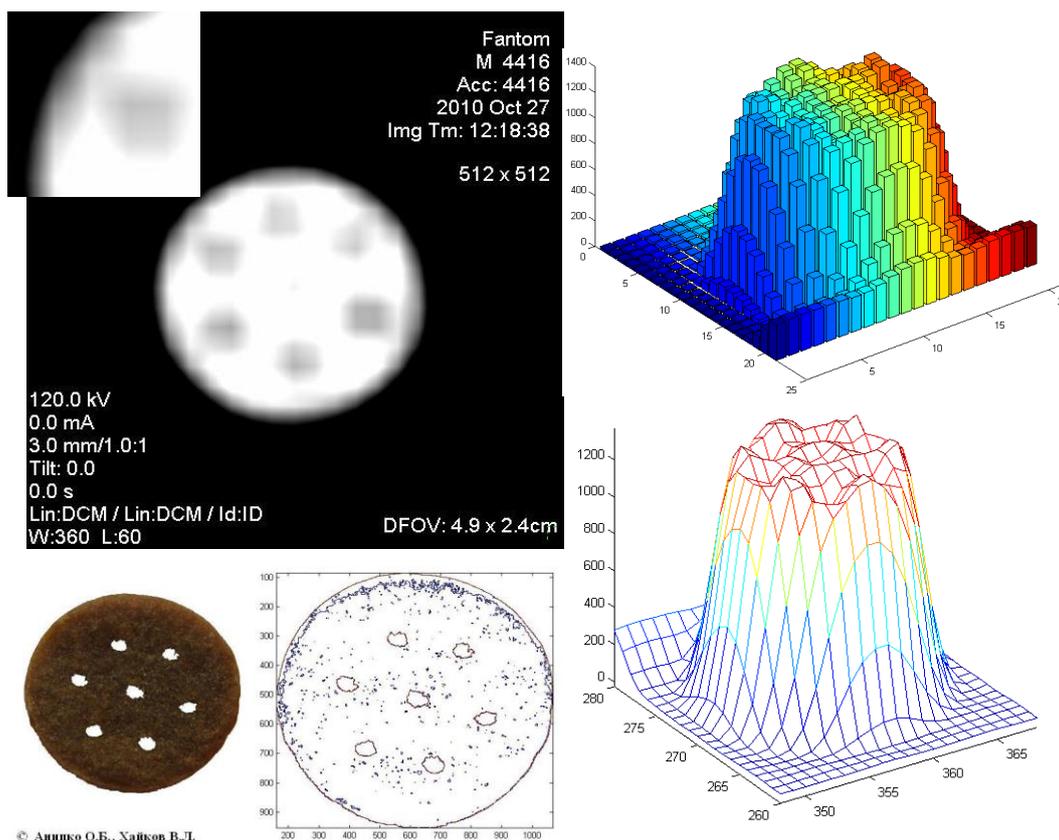


Рисунок 10 – Этапы рентгеновского томографического и оптического исследований ПЭ

Методика обработки томографических изображений сечений ПЭ заключается в последовательном выполнении четырех этапов:

- сегментация;

- реконструкція;
- побудова ізоліній;
- аналіз результатів.

Сутью сегментації зображення є виділення контура ПЭ на фоні підстилюючої поверхні. На другому етапі виконувалась реконструкція розподілення щільності всередині ПЭ. Третій етап полягав у побудові ліній однакового рівня, що відповідає однаковим градаціям сірого кольору, а, відповідно, однаковим числам Хаунсфілда. Аналіз змінення розподілення щільності по шарах вироблявся на четвертому етапі.

Результати сегментації показані на рис. 10 двумірний графік (фото в правому верхньому куті). Геометричні розміри об'ємного вокселя склали $1,0 \times 1,0 \times 3,0$ мм. Виділення корисного сигналу (пікселів, що характеризують ПЭ) на фоні підстилюючої поверхні (пікселів, що характеризують фон) вироблено методом амплітудної дискримінації.

Реконструкція ПЭ з допомогою двумірної сплайн апроксимації представлена на рис. 10 в лівому нижньому куті. Значення по осі Z на двох двумірних графіках рис. 10 представляють собою градації сірого кольору в отриманому томографічному зрізі.

Змінення ізоліній, що характеризують однакові значення сірого кольору на чотирьох томографічних зрізах ПЭ представлено на рис. 11.

Результати томографічного дослідження. На основі проведеної аксіальної рентгеновської комп'ютерної томографії отримано якісне представлення про форми та розподілення щільності порохової маси всередині ПЭ піроксилінового високоазотистого пороха.

Установлено, що геометрія томографічного зрізу ПЭ залежить від двох факторів: від форми ПЭ та від точності його розташування по осі гентри томографа. Для циліндричного семіканального пороха при дотриманні соосності були отримані сечення близькі до кола. Відхилення від ідеальної круглої форми пояснюються як допустимими відхиленнями від ідеальної геометрії при виробстві ПЭ, так і нерівномірністю щільності по краю (по окружності) та від краю всередину.

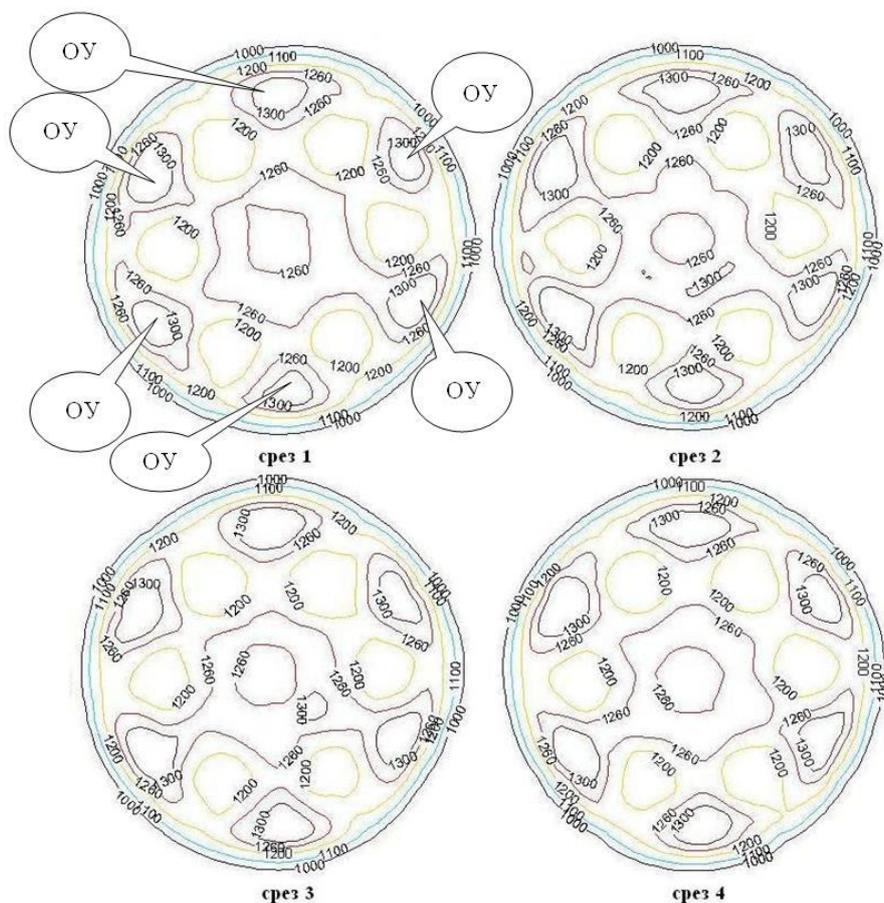


Рисунок 11 – Ізолінії значень сірого кольору на чотирьох томографічних зрізах ПЭ (ОУ – область ущільнення)

Градации серого цвета имеющие место на томографических срезах необходимо поставить в соответствие с рентгеновской плотностью (числам Хаунсфилда). Это позволит хотя и приближенно перейти к истинной плотности пороха. По мере накопления наблюдений плотности пороха переход к истинной плотности становится необязательной процедурой, так как плотность в числах Хаунсфилда может быть внесена в нормативную документацию исследуемой пороховой партии (партии боеприпаса) на стадии выделки пороха, снаряжения боеприпаса, контрольных технических осмотров артиллерийских выстрелов.

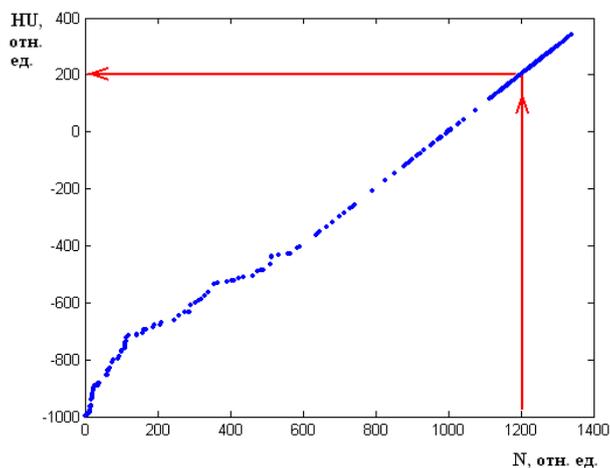


Рисунок 12 – График соответствия чисел Хаунсфилда градациям серого цвета томографических срезов

Определение чисел Хаунсфилда для представленных на рис. 11 томографических срезов проведено с помощью программного продукта анализа DICOM изображений – eFilm Lite. Каждому пикселю томограммы (рис. 11) была поставлена соответствующая рентгеновская плотность по Хаунсфилду. Так градация серого цвета в 1000 единиц соответствует число Хаунсфилда 0 (плотность воды), а градация серого цвета в 1200 единиц соответствует числу 200, которое приближается к плотности костной ткани.

Распределение плотности в ПЭ типа семиканальный цилиндр имеет сложную морфологию, характеризующуюся двумя видами неоднородностей: неоднородность первого вида (НПВ) имеет место внутри среза; неоднородность второго вида (НВВ) – внутри всего ПЭ.

НПВ выражается в уменьшении плотности в двух направлениях: от «центра ПЭ» к «краю ПЭ»; от «межканального пространства» к «краю канала ПЭ». При этом были зафиксированы шесть областей уплотнения (ОУ) с числами Хаунсфилда равными 300 ± 50 . ОУ были расположены в пространствах между внешним краем ПЭ и семью каналами (рис. 11). Данные ОУ наблюдались во всех четырех срезах ПЭ и в срезах других ПЭ.

НВВ имеет иное проявление. Плотность пороховой массы увеличивается в направлениях от граничных срезов к срединным. Площадь фигур ограниченных линиями одинакового уровня с одним и тем же значением плотности в срединных срезах приблизительно в 1,2–1,5 раз больше чем в граничных. Также было отмечено появление аномальных участков уплотнения в срединных срезах, которые больше не проявлялись ни в соседних, ни в граничных срезах. Так например, в срезе №2 к шести ОУ расположенных между семью каналами и внешним краем ПЭ (контур 1300) добавились еще три (рис. 11). Одна видоизмененная область (контур 1300) еще была зафиксирована в срезе №3, а проявления двух остальных нигде более не было обнаружено.

Характер НПВ и НВВ цилиндрического семиканального пороха позволяет предположить то, что плотность ПЭ уменьшается неравномерно по его объему. Градиент изменения плотности ПЭ от внешней границы вглубь зависит от месторасположения среза. Наиболее резко выраженные неоднородности выявлены в срезах лежащих ближе к поверхности ПЭ. Ввиду большей площади внешней поверхности уменьшение плотности у внешнего края ПЭ больше по сравнению с аналогичными изменениями у краев внутренних семи каналов. Более детальное описание выявленных неоднородностей ПЭ невозможно без создания специального программного обеспечения, способного создавать трехмерный усредненный по некоторой репрезентативной выборке образ ПЭ. Решение данной задачи является дальнейшим шагом авторов в этом направлении.

Выводы

Томографический экспресс-контроль плотности порохового заряда позволит более объективно устанавливать техническое состояние артвыстрела и даст возможность рационально управлять расходом ресурса ствола КАУ путем ограничения (исключения) его перегрузок выстрелами сопровождающимися максимальными давлениями, превышающими установленные пределы.

Наиболее информативным и доступным измерению характеристикой ПЭ является плотность и ее распределение внутри ПЭ (заряда). Технически контроль плотности, а также определение количества пороховой пыли возможно реализовать за счет проведения с артбоеприпасом РКТ исследования. Использование РКТ потребует расширения номенклатуры плотностей пороха, за счет введения так называемой рентгеновской плотностью, выраженной в числах Хаунсфилда.

Распределение плотности внутри пороховой массы высокоазотистого пироксилинового семиканального пороха позволяют говорить о существовании как областей с пониженной плотностью, так и уплотненных зон, которые при горении пороха будут влиять на изменение характеристик прогрессивности горения заряда, и следовательно, изменять закон газогенерирования.

Эффект достижения максимального давления превышающего табличное будет иметь место в артбоеприпасах ПЭ, которых характеризуются более развитой порозностью у поверхности и значительным количеством пороховой пыли. С точки зрения томографической диагностики такие боеприпасы будут иметь более пологий плотностной переход от края ПЭ к центру. При этом скачкообразный перепад плотностей будет ослаблен или отсутствовать полностью. Пороховая пыль под воздействием сил гравитации визуализируется как компактное «облако» у нижнего края стенки.

Несмотря на 30-летнее существование метода РКТ, его значительный информационный потенциал и распространенность в медицинских и промышленных приложениях, на сегодняшний день он до сих пор не стал рабочим средством неразрушающего контроля боеприпасов (их комплектующих элементов). Однако при переходе от контроля текущего состояния боеприпасов к их прогнозирующему мониторингу РКТ имеет все шансы стать основным средством экспресс диагностики самого распространенного продукта оборонной промышленности – артиллерийского выстрела.

Литература

1. Мордасов Д.М., Мордасов М.М. Технические измерения плотности сыпучих материалов: Учеб. пос. – Тамбов.: Изд-во ТГТУ, 2004. – 80 с.
2. 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.
3. P. Lamarque, Jm . Tauzia. Estimation de la duree de vie des systemes propulsifs a propergol solide: perspectives offertes par l'utilisation de la tomographie haute energie. Proceed. 87th Symp. of the Propulsion and Energetics Panel of the AGARD, Athens, Greece, 1996.
4. M. Antonakios, Ph. Rizo. Real Time Digital Tomosynthesis System Dedicated to Industrial Solid Rocket Motor Examination. 15th World Conference on Nondestructive Testing.– Roma (Italy) 15–21 October 2000 // <http://www.ndt.net/article/wcndt00/papers/idn204/idn204.htm>
5. Вайнберг И.А., Вайнберг Э.И. Компьютерные томографы для неразрушающего контроля и количественной диагностики изделий аэрокосмической промышленности // <http://engine.avias.com/issues/56/page19.html>

УДК 623.451.4

Аніпко О.Б., Хайков В.Л.

ЭКСПРЕС ПЛОТНОМЕТРИЯ МЕТАЛЬНИХ ЗАРЯДІВ КОРАБЕЛЬНИХ АРТИЛЕРІЙСЬКИХ БОЄПРИПАСІВ

Приведено аналіз металних зарядів корабельної артилерії та запропоновано метод аналізу щільності пороху.

Anipko O.B., Haikow V.L.

EXPRESS DENSITOMETRY OF GUN PROPELLANT CHARGE FOR SHIP ARTILLERY AMMUNITIONS

The analysis propellant charge for ship artillery ammunitions is executed and the method of analysis density of propellant is offered.