

**МЕТОД РЕНТГЕНОВСКОЙ КОМПЬЮТЕРНОЙ ТОМОГРАФИЧЕСКОЙ ПЛОТНОМЕТРИИ
ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ АРТИЛЛЕРИЙСКИХ БОЕПРИПАСОВ**

Рентгеновская компьютерная томография (РКТ), получившая впервые свою аппаратную реализацию к началу 1970-х годов и, задуманная как один из методов медицинской диагностики, уже к началу 1980-х годов начала использоваться в промышленности [1]. Одним из первых ее приложений в военном деле стала дефектоскопия твердотопливных ракетных двигателей [2, 3]. С появлением высокоточного управляемого (корректируемого) артиллерийского оружия РКТ и цифровая рентгеноскопия начали использоваться для контроля артиллерийских боеприпасов [4] на этапах их производства и эксплуатации.

Ввиду того, что при долговременном хранении средств поражения в их материалах протекают трансформации, связанные с изменением плотностных характеристик, то использование РКТ, обеспечивающую проведение бесконтактного и неразрушающего зондирования, является наиболее рациональным способом оценки плотности взрывчатых веществ (бризантных и метательных) на различных сроках эксплуатации.

Целью работы является описание возможностей и способов использования метода рентгеновской компьютерной томографической плотнометрии (РКТП) в качестве инструмента экспресс контроля состояния артиллерийских выстрелов.

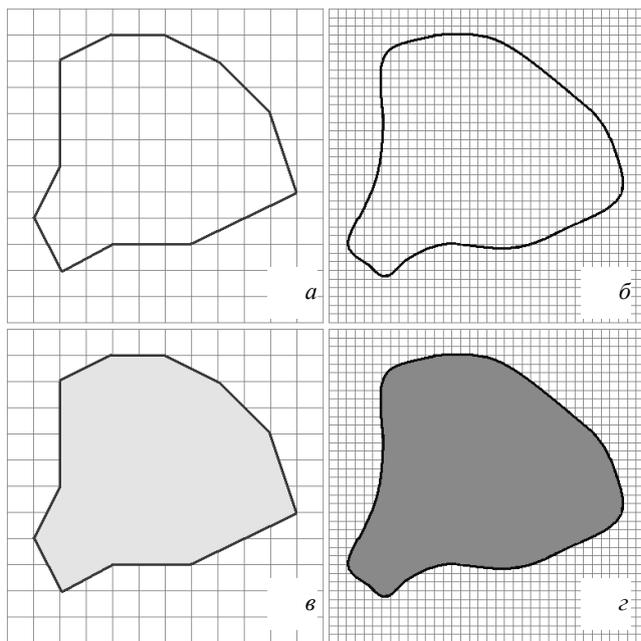


Рисунок 1 – Две задачи РКТП на плоскости

геометрическую фигуру (рис. 1 а). Внутри нее плотность увеличивается или уменьшается по некоторому закону, но не равна заданному на ее контуре значению. Если произвести интерполяцию на более частую сетку получим сглаживание границ (рис. 1 б). Определение средней плотности на всех узлах сетки внутри полученного контура (рис. 1 а) совершим на основе выражения:

$$\bar{\rho} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \rho_j = \frac{1}{n} (\rho_1 + \dots + \rho_n) \Big|_{contour},$$

где $\bar{\rho}$ – вычисленное среднее значение плотности; n – общее количество узлов сетки внутри контура; j – номер узла сетки в диапазоне от 1 до n ; $contour$ – обозначение суммирования элементов, находящихся внутри контура.

Основой метода РКТП является проведение постобработки томографических проекций исследуемого объекта (элементов боеприпаса) с целью выявления функциональных зависимостей в распределении плотности. РКТП дает возможность решать задачи оценок плотности объекта (элементов боеприпаса), как на плоскости, так и в пространстве.

Основными задачами на плоскости являются:

- получение плоскостной геометрической фигуры, на краях которой плотность равна заданному значению;
- определение статистических характеристик, например, средней плотности вещества находящегося внутри контура найденной плоской фигуры.

Графическая интерпретация первых двух задач приведена на рисунке 1. Допустим для каждого из узлов квадратной сетки известно значение плотности. Тогда если задаться определенным значением плотности ρ и найти все точки с этим значением на сетке и соединить их линиями, получим контурную

Серый цвет, которым закрашена фигура рисунка 1 *в* характеризует величину полученного среднего значения. Если ту же операцию произвести со значениями, приведенными на рисунке 1 *б*, то ввиду большего их числа (большого количества узлов) и иного контура, получим отличное от рисунка 1 *в* значение средней плотности $\bar{\rho}$, что и иллюстрируется другим оттенком.

К задачам РКТП в пространстве следует отнести:

- идентификацию в пространстве поверхности, плотность в каждой точке, которой постоянна и равна заданной величине;
- определение статистических характеристик величины усредненной плотности внутри объема ограниченного полученной поверхностью.

Далее рассмотрим последовательность действий при РКТП исследованиях плотностных аномалий применительно к взрывчатым веществам артиллерийских выстрелов.

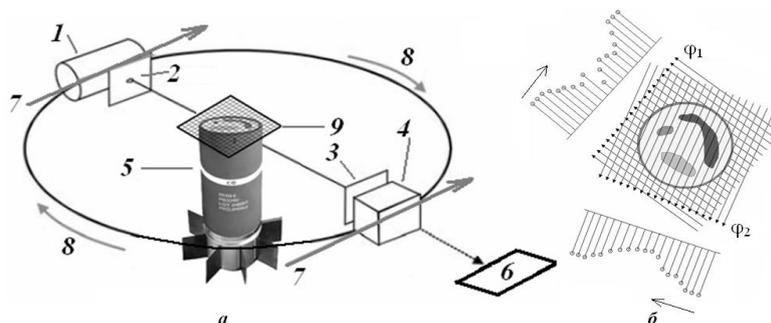


Рисунок 2 – Принцип рентгено-томографического сканирования боеприпаса

Рентгено-томографическое изображение боеприпаса создается при его сканировании рентгеновским томографом. В качестве примера рассмотрим томографическую систему второго поколения (рис. 2 *а*) состоящую из: источника ионизирующего излучения (1) формирующего коллиматора (2), системы детектирования тонкого луча (приемный коллиматор и датчик ионизирующего излучения – 3, 4), вертикально находящегося боеприпаса (5), блока регистрации проекций (6).

Для получения аксиальной проекции боеприпаса под углом φ_1 (рис. 1 *б*) блоки (1–4) равномерно, синхронно, прямолинейно (7) перемещаются относительно боеприпаса (5), который из соображений безопасности неподвижен. На рисунке (рис. 2 *б*) факт перемещения в направлении слева направо показан стрелкой, а проекция по углу φ_1 есть в данном случае совокупность 19-ти значений интенсивности излучения, которые замерены с некоторой дискретностью, определяемой шагом перемещения блоков (1–4). Для получения проекции под углом φ_2 блоки (1–4) первоначально совершают оборот на заданный угол (8), а после совершают прямолинейное равномерное движение относительно боеприпаса (5) в направлении слева направо (рис. 2 *б*).

Результатом сканирования является совокупность аксиальных томографических проекций. Каждая, из которых характеризуется углом φ и состоит из n дискретных отсчетов. Если дискретность сканирования по углу φ составляет 1° , а каждая проекция состоит из 19 отсчетов как показано на рисунке 2, то за полный оборот 360° для слоя k имеет место 359 проекций ($1^\circ, 2^\circ, 3^\circ, \dots, 359^\circ$) и будет зарегистрировано $19 \times 359 = 6821$ значений интенсивности зондирующего сигнала. Эти данные, поступая на вход блока реконструкции, являются входной информацией для реконструктивных алгоритмов, задача которых восстановить структуру аксиального среза.

На вход блока реконструкции подается информация о всех зафиксированных проекциях (в нашем случае 359) и о 6821-м значении интенсивности зондирующего сигнала. Параметрами реконструирующего алгоритма являются характеристики геометрии сканирования и пространственно-энергетические данные блока детекторов и рентгеновской трубки. В результате реконструкции аксиального среза (рис. 3. *а*) получим квадратную матрицу (для нашего случая $19 \times 19 = 361$ элемент или узлов сетки) (рис. 3 *б*). Ее элементами (узлами сетки) являются пиксели содержащие данные о линейном коэффициенте ослабления, выраженном в единицах денситометрического показателя, так называемых единицах Хаунсфилда (Hounsfield unit, HU). Как правило, изображение томографического среза является монохромным (серым), что определяется принятой системой кодирования денситометрического показателя, в которой каждому оттенку базового цвета (серого) соответствует некоторое его значение. Если серый цвет кодируется 1024 градациями, то такое же их количество имеет и денситометрический показатель. Каждому значению пикселя (2) в матрице (1) соответствует один разрешающий объем

томографа (3), который определяется дискретностью аксиальной томографической проекции и толщиной среза. Если эти значения равны 0,5 мм и 1 мм, то величина разрешающего объема равна $0,5 \times 0,5 \times 1 = 0,01$ мм³.

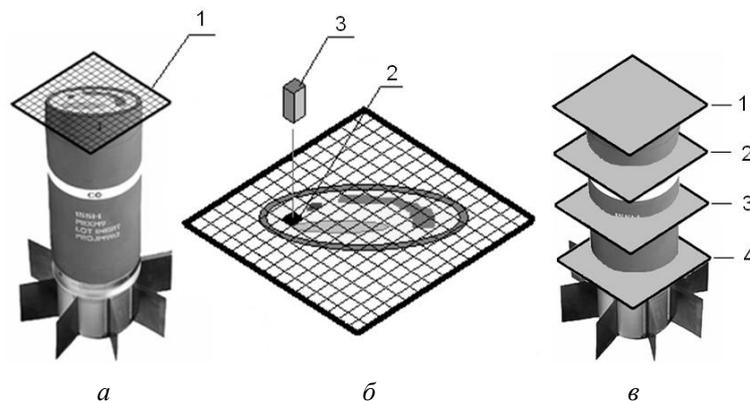


Рисунок 3 – Элементы томографического сканирования:

a – томографический срез №1; *б* – матрица оценок плотности; *в* – томографические срезы № 1–4:
1 – совмещение матрицы с местом «физического» среза; 2 – пиксель изображения; 3 – разрешающий объем

Для получения аналогичной совокупности проекций, но для другого среза, система источник и детектор должны переместиться относительно боеприпаса на расстояние ΔL вдоль его продольной оси. На рисунке 3 эти перемещения показаны в виде срезов 1–4, относительно уже обработанного верхнего среза 1. Если боеприпас имеет длину 500 мм, а установленная оператором дискретность томографических срезов равняется 1 мм, с дискретностью регистрации проекций 1°, то для получения информации о 500 слоях ($k=500$) необходимо совершить 500 сдвигов и получить $500 \times 359 = 179.500$ проекций. Если каждая из них состоит из 19 отсчетов, то общее количество равно $179.500 \times 19 = 3.410.500$ шт. Таким образом, при наличии 500 томографических срезов алгоритм реконструкции будет проводить восстановление 500 раз, используя каждый раз 359 новых проекций.

В случае необходимости получения трехмерного изображения используются алгоритм рендеринга, который реализуется на основе уже полученных томографических срезов. В нашем случае этот алгоритм потребует 500 восстановленных томографических срезов, полученных на предыдущих 500 шагах, т.е. такого же количества реализаций алгоритма реконструкции сечений.

Так как в рассмотренном примере каждое сечение имело 19 отсчетов, а современные сканеры фиксируют 512 и 1024 элемента и обрабатывают матрицы размером 512×512 , 1024×1024 , то напряженность поступления измерительной информации и объем вычислений значительно возрастают. Для матрицы с шириной в 1024 элементов, 356 проекций и 500 срезах количество измерений равно 182.272.000. Если время сканирования боеприпаса приравнять равным 5-ти минутам, то скорость измерений должна равняться 607.353 измерениям в секунду.

Лучевая нагрузки на взрывчатое вещество боеприпаса полученная им от РКТ сканера не наносит ему негативного эффекта, поэтому боеприпасы могут многократно подвергаться такого рода «просвечиваниям». Выходной информацией прибора является послойные аксиальные срезы и трехмерный образ исследуемого объекта, которые дополняют друг друга.

Современная аппаратура медицинских рентгено-томографических исследований позволяет анализировать внутреннюю структуру предмета с диаметром 1–500 мм при разрешающей способности 0,1–0,5 мм. Характеристики томографических сканеров позволяют получать удовлетворительные характеристики реконструированных изображений объектов в полимерных оболочках и оболочках из металла толщиной до 0,2 мм.

На рис. 4 представлены последовательности действий при определении усредненной плотности в томографическом срезе и по совокупности срезов. На фрагменте *a* (рис. 4) изображен аксиальный срез пучка, состоящего из 7-ми вертикально расположенных цилиндрических семиканальных пороховых элементов без внешней оболочки. «Виртуальное» разделение элементов пучка на 7-мь сечений равного уровня, но 7-ми разных пороховых элементов представлено на фрагменте *б* в виде частей 1–7. Усредненная плотность по сечению будет найдена после усреднений плотностей в каждом из 1–7 частей. Последовательность получения усредненной плотности по совокупности срезов представлено на рисунке 4 *в*. В этом случае усреднение ведется по срезам 1–4.

Последовательность выявления плотностных аномалий показана на рисунке 5. Для этого были взяты три образца трубчатого пороха 16/1 ТР, их фотографии представлены на фрагментах *а–в*.

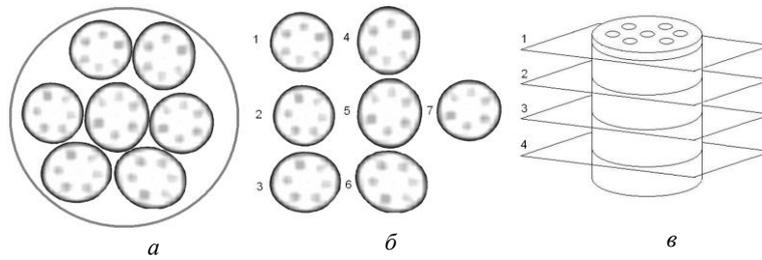
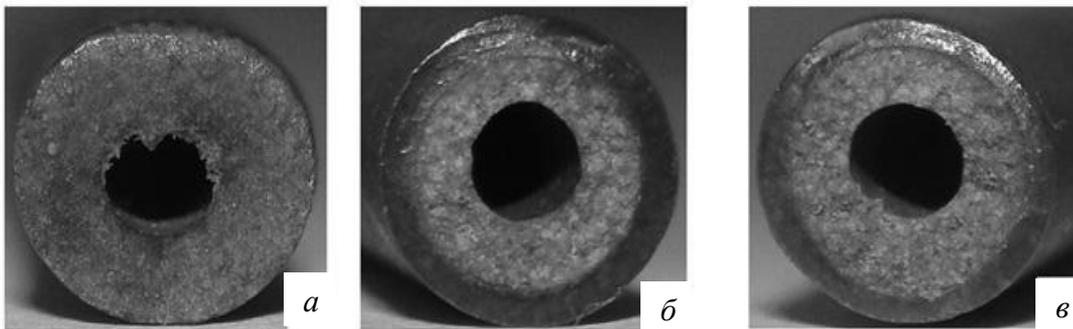
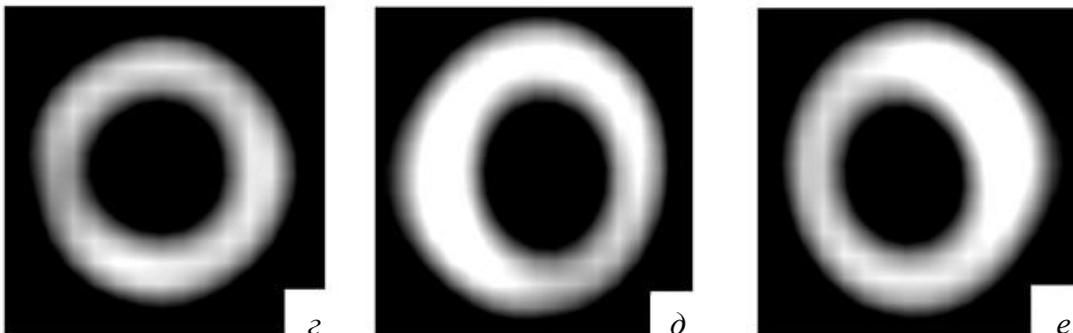


Рисунок 4 – Определение плотности в сечении и по объему порохового элемента

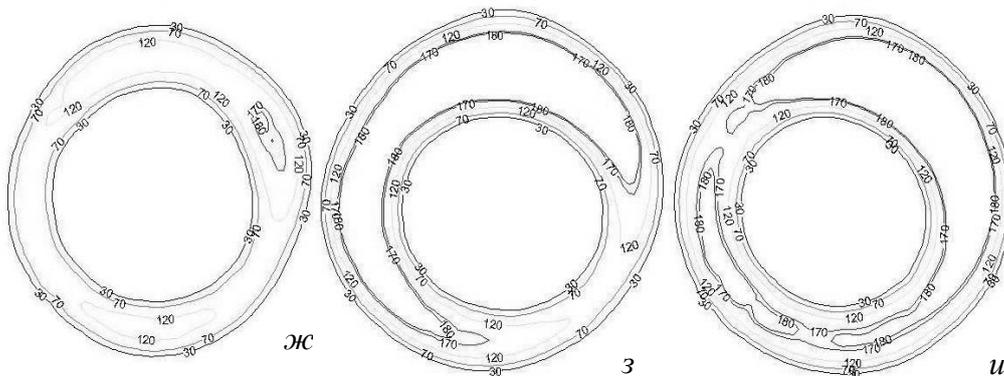
Фотографии трех срезов различных трубок пороха 16/1 ТР



Томограммы (сечения) трех разных трубок пороха 16/1 ТР



Реконструкция геометрических и плотностных характеристик



© В.Л. Хайков

Рисунок 5 – Рентгено-томографическое исследование плотностных аномалий трубчатого пороха 16/1 ТР

Результаты проведения РКТ сканирования трех трубок представлены на фрагментах *з–е*. Трубки пороха были расположены на гентри РКТ сканера двумя вариантами: друг за другом; одна около другой.

Сравнение отсканированных изображений показало отсутствие взаимного негативного влияния пороховых элементов друг на друга. Результаты обработки томограмм с выявлением областей равной плотности представлено на фрагментах *ж-и*. Чем больше толщина горящего свода, тем выше плотность в центре пороховой массы. Нарастание плотности в толщу порохового элемента имеет примерно одинаковую тенденцию для разных трубок. При равной толщине горящего свода фиксируются аномалии плотности на одинаковой глубине относительно внешней поверхности порохового элемента. Например, если направление 0° совпадает с вертикалью к фотографиям, то тогда для фрагмента *ж* имеет место область уплотнения по азимуту 50° , которая не фиксируется более ни в по каким направлениям. На фрагменте *ж* аномалии имеют место по азимуту 90° и в диапазоне $180^\circ-190^\circ$, на фрагменте *и* фиксируются две аномальных области по азимуту $190^\circ-200^\circ$ и $290^\circ-310^\circ$.

На рисунке 6 показана последовательность постобработки томографических срезов. На фрагментах *а-в* представлены первичные гистограммы значений денситометрического параметра полученные в результате РКТ сканирования. Данные хранятся в трех матрицах размером 17×17 элементов. Их линейная двумерная интерполяция представлена на фрагментах *з-е*. В результате такого преобразования получаем поверхности, которые характеризуют изменение плотности в томографическом сечении. Результат пересчета значений плотности из матрицы размером 17×17 в матрицу 161×161 элемент с заменой линейной интерполяции промежуточных данных кубической, показан на фрагментах *ж-и*. Поверхность ПЭ по сравнению с линейной интерполяцией стала более плавной, введена цветовая шкала плотности. Далее к каждой из кратероподобной поверхности был применен алгоритм построения линий равного уровня, в результате чего были получены фрагменты *ж-и* рисунка 6.

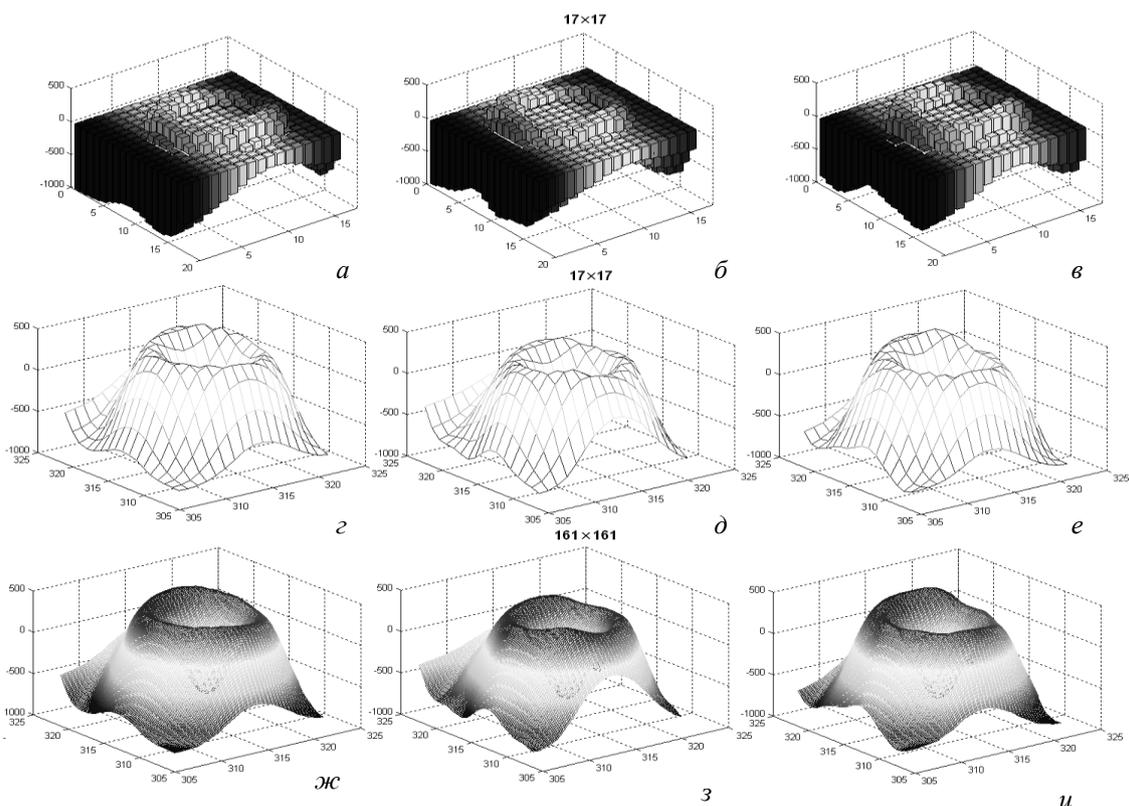
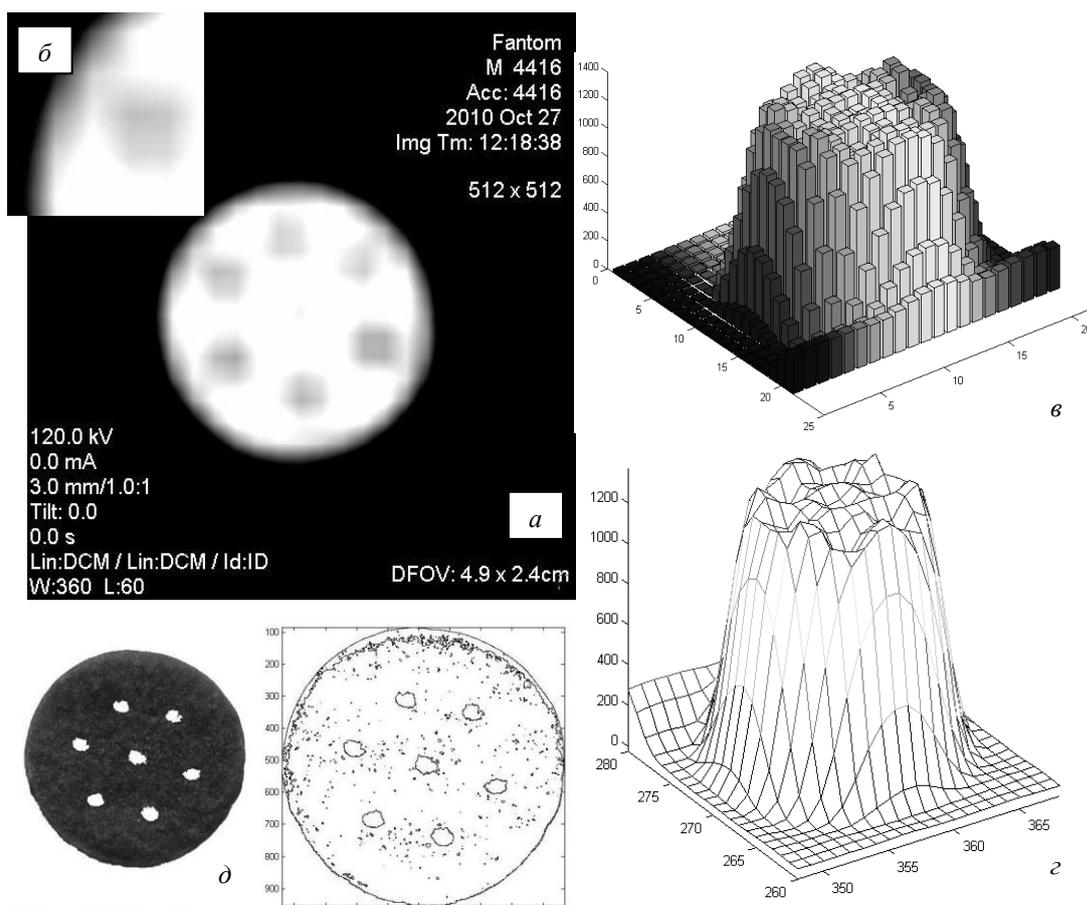


Рисунок 6 – Последовательность постобработки томографических срезов трубчатого пороха 16/1 ТР

На рисунке 7 показаны результаты рентгено-томографического исследования плотностных аномалий зерненного пороха 12/7 БП. Томографическое сечение порохового элемента представлено на фрагменте *а*, а его увеличенный сегмент показан на фрагменте *б*. Распределение денситометрического параметра в виде гистограммы (матрица 17×17) иллюстрируется на фрагменте *в*. Совокупный эффект увеличения плотности сетки и использование кубической интерполяции позволяют перейти от гистограммы к поверхности (фрагмент *з*), которая также может быть обработана алгоритмом поиска линии одинакового уровня. Результат оптических исследований ПЭ с использованием фотографирования на просвет иллюстрирует фрагмент *д* (в качестве сравнения с томографией).

РКТП при исследовании пороховых метательных зарядов может быть реализован двумя способами.

Способ 1. Сущностью первого способа является проведение оценок усредненной плотности в пороховом метательном заряде без отождествления срезов с пороховыми элементами. Допустим выполнено 50 аксиальных срезов порохового метательного заряда. Размер анализируемой матрицы 1024×1024. С использованием плотностных и морфологических особенностей заряда и базовых пороховых элементов в каждой из 50-ти матриц «выбраковываются» элементы (пиксели) не относящиеся к пороховым элементам (гильза, воспламенитель, газовая среда и т.д.). Эта процедура может быть реализована за счет амплитудного дискриминатора, который отсеивает все значения больше, меньше установленных порогов. Далее в каждом сечении, для оставшихся точек, суммируются значения денситометрического показателя и делятся на количество рассматриваемых элементов матрицы. Следующим этапом усреднения является определение среднего значения по каждому из сечений. В результате получаем $\bar{\rho}$ являющееся оценкой усредненной плотности пороха порохового метательного заряда.



© Анипко О.Б., Хайков В.Л.

Рисунок 7 – Рентгено-томографическое исследование плотностных аномалий гранулированного пороха 12/7 БП

Способ 2. Отличием второго способа РКТП является операция отождествления 3–4 последовательных областей (отдельных частей) сечений различного уровня с пороховым элементом, и нахождение его усредненной плотности, а не усредненной плотности всех пороховых элементов в некотором сечении гильзы, как в первом способе. Далее необходимо построить гистограмму накопленных частот усредненных плотностей ПЭ, рассматриваемого заряда. Размах гистограммы (ширина) и ее высота определяются, как плотностными, так и количественными характеристиками ПЭ заряда.

Ввиду того, что количество ПЭ в заряде превышает 500, при дальнейшей статистической обработке гистограммы накопленных частот возможна оценка закона распределения усредненных плотностей, и определение таких его характеристик как среднее значение, дисперсия. Таким образом, в способе 2 пороховой метательный заряд рассматривается в его естественном виде как совокупность ПЭ. После обработки и определения усредненной плотности каждого ПЭ всю их совокупность можно разделить на

несколько плотностных фракций, влияние которых может быть учтено при решении основной задачи внутренней баллистики.

Периодическое проведение РКТП с некоторым интервалом позволяет рассматривать усредненную плотность заряда как случайную функцию времени (срока хранения), которая для артиллерийского выстрела является единичной реализацией, а для партии выстрелов ансамблем реализаций. На основе такого подхода могут быть определены корреляционные характеристики, вплоть до спектральных. Анализ доступных литературных публикаций показал, что такой подход применительно к метательным зарядам артиллерийских боеприпасов при изучении их геронтологии ранее не использовался.

На рисунке 8 отображены модельные примеры, рассматриваемые как результаты реализаций первого и второго способов РКТП. Ориентация и направление осей на рисунках 8 а, 8 б и 8 в одинаковая.

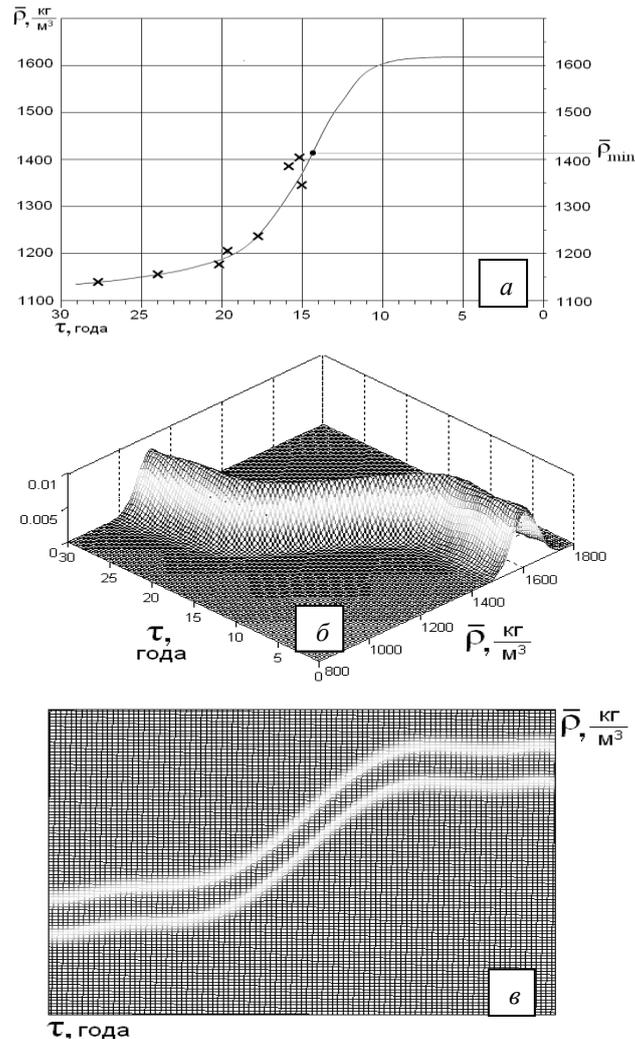


Рисунок 8 – Способы реализации метода РКТП

На фрагменте а (рис. 8) показаны оценки усредненной плотности пороха порохового метательного заряда, выполненные по способу 1 [6]. Значения $\bar{\rho}$ являются убывающей функцией времени. Периодическое проведение РКТП позволит определить динамику плотностных трансформаций, прогнозировать изменение усредненной плотности на перспективу. Решение основной задачи баллистики для фактических характеристик порохового метательного заряда позволит оценить степень влияния достигнутых плотностных изменений на боевой эффект и на безопасность стрельбы.

При допущении того, что усредненная плотность пороха порохового метательного заряда является средней плотностью по ПЭ, а закон ее распределения является нормальным, модель фрагмента а рис. 8 становится частным случаем более общей модели геронтологических изменений в пороховом заряде (рис. 8 б). Изображенная поверхность, является трансформацией закона распределения усредненных

плотностей ПЭ порохового заряда. В данном случае оценка математического ожидания меняется в соответствии с (рис. 8 а), а дисперсия во времени постоянна. На рисунке (рис. 8 в) показана проекция сверху и «корридор» ширина которого равна 6-ти среднеквадратическим отклонениям.

Введение закона распределения плотности позволяет определять вероятностные характеристики физической плотности порохового заряда. Так например, можно оценить вероятность ее нахождения в заданном интервале и ее изменение во времени. Такой подход делает возможным установление корреляционных связей во времени, а, следовательно, закладывает основы научно обоснованных прогнозов изменения состояния пороховой массы, основанных на статистических оценках.

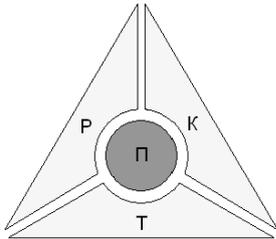


Рисунок 9 – Основы метода РКТП

Выводы.

Метод РКТП (рис. 9), разработан с целью получения усредненных плотностей (литера «П») пороховых элементов и дальнейшей статистической обработки плотнострической информации в интересах контроля текущего состояния порохового заряда и прогнозирования его состояния на определенный временной интервал.

Основой РКТП является совокупность трех технологий, каждая из которых является необходимым, но недостаточным условием при реализации этого вида плотнострических исследований:

- рентгеноскопия (литера «Р») обеспечивает неконтактный, неразрушающий способ зондирования исследуемого объекта;
- компьютерная обработка данных (литера «К»), делающая возможным переработку значительного объема измерений в режиме реального времени;
- томография (литера «Т») является программно-аппаратным способом организации взаимодействия рентгеноскопии и компьютерной обработки ее данных.

Информационные возможности РКТП позволяют определять, как частные характеристики (контур плотностной аномалии), так и общие (усредненная плотность среза и усредненная плотность ПЭ), что позволяет производить анализ разных иерархических уровней: например,

- порохового заряда и партии артиллерийских выстрелов;
- фактического состояния и прогноза состояния на перспективу.

Литература

1. Lampe David. CIT scanners. Popular science. September 1983. Vol. 223. №3. p.p. 52–56.
2. Bakke Timothy. Giant scanner inspects rocket motor. Popular science. March 1984. Vol. 224. №3. p.p. 95.
3. Вайнберг И.А., Вайнберг Э.И. Компьютерные томографы для неразрушающего контроля и количественной диагностики изделий аэрокосмической промышленности. Двигатель. Том 56, 2 2008 с. 19–21.
4. X-ray imaging technology development laboratory. U.S. Armament Research, Development, and Engineering Center, Picatinny. Электронный интернет ресурс – http://www.pica.army.mil/TechTran/facilities/xray_imaging.asp.
5. Anderson J., Jackson A., Martin H., Schubert J. Nondestructive evaluation of naval munitions using X-Ray CT. Research in Nondestructive Evaluation. Vol. 22, Issue 1, 2011. p. 16–30.
6. 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

Аніпко О.Б., Хайков В.Л.

**МЕТОД РЕНТГЕНІВСЬКОЇ КОМП'ЮТЕРНОЇ ТОМОГРАФІЇ ЩІЛЬНОСТІМЕТРІЇ
ВИБУХОВИХ РЕЧОВИН АРТИЛЕРІЙСЬКИХ БОЄПРИПАСІВ**

Наведено опис методу рентгенівської комп'ютерної томографічної щільностіметрії вибухових речовин артилерійських боеприпасів.

Anipko O.B., Khaikov V.L.

**THE METHOD OF X-RAY COMPUTED TOMOGRAPHIC DENSITYMETRY EXPLOSIVES
ORDNANCE**

A description of the method of X-ray computed tomographic densitometry explosive ordnance is given.