

УДК 623.451.4

# РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ ИНСТРУМЕНТАЛЬНОГО КОНТРОЛЯ И ВИЗУАЛИЗАЦИИ СОСТОЯНИЯ КАНАЛОВ СТОЛОВ Артиллерийских орудий

В. Л. Хайков

Кандидат технических наук, доцент  
Научно-организационный отдел  
Академия военно-морских сил  
им. П.С. Нахимова

ул. Павла Дыбенко 1А, г. Севастополь, Украина,  
99028

E-mail: wadimhaikow@inbox.ru

*У роботі виконаний аналіз розвитку методів інструментального контролю стану гладких та нарізних артилерійських стволів. В результаті показано, що генезис методів контролю від одиничних контактних вимірів рухається в напрямі безконтактного сканування поверхні ствола з наступною математичною обробкою експериментальних даних*

*Ключові слова: артилерійський ствол, інструментальний контроль, знос артстволола, візуалізація даних*

*В работе дан анализ развития методов инструментального контроля износа гладких и нарезных артиллерийских стволов. В результате показано, что генезис методов контроля канала ствола движется в направлении от единичных точечных контактных измерений к бесконтактному сканированию (картографированию) поверхности ствола с последующей математической обработкой экспериментальных данных*

*Ключевые слова: артиллерийский ствол, инструментальный контроль, износ артстволола, визуализация данных*

## 1. Введение

Тенденция к увеличению количества огневых задач артиллерии в вооружённой борьбе, использование при этом высокоэнергетичных порохов с повышенным эрозийным воздействием, ужесточение режимов стрельбы и условий эксплуатации артиллерийских установок приводят к необходимости совершенствования методов и средств контроля состояния артиллерийских стволов.

Общемировая тенденция старения запасов артиллерийских боеприпасов, накопленных разными странами за время холодной войны, делает актуальным задачу создания системы мониторинга их состояния. В рамках таких систем приборы контроля стволов позволяют установить степень негативного воздействия «старых» боеприпасов на канал ствола и отследить возможное усиление такого влияния по мере увеличения календарного срока артиллерийских выстрелов.

## 2. Постановка задачи

Целью статьи является обзор развития методов и средств контроля состояния канала ствола, установление основных тенденций развития визуального представления данных по их износу.

## 3. Анализ современной практики контроля нарезных стволов

Значительный опыт применения нарезной и гладкоствольной артиллерии показал, что эффективность

огня находится в функциональной зависимости от качества поверхности канала ствола и от качества используемых боеприпасов. В процессе боевого использования ствольной системы ствол выступает в качестве повреждаемого элемента артиллерийской установки. Качество внутренней поверхности канала ствола орудия от выстрела к выстрелу изменяется в сторону ухудшения и, наконец, достигает такого состояния, которое не обеспечивает необходимых баллистических характеристик.

Многогранность проявления явления износа, сложность его контроля и прогнозирования вынуждает эксплуатационников вместо контроля геометрических изменений поверхности канала ствола по всей его площади переходить к слежению за изменениями только определённых «информативных» параметров (зон). Практическая реализация такого подхода привела к дифференцированию методов контроля состояния нарезных и гладких стволов [1, 2].

Для нарезного ствола в качестве информативного параметра была выбрана интенсивность «каморного» износа, то есть удлинение зарядной каморы ствола (ЗКС). Процесс увеличения ее объёма адекватно характеризует работоспособность нарезного ствола, так как между удлинением ЗКС  $\Delta l$  (иногда используется обозначение  $\Delta L$ ) и падением начальной скорости снаряда  $\Delta v_0$  существует функциональная зависимость  $\Delta v_0 = f(\Delta l)$ . Удлинение ЗКС рассчитывается по формуле

$$\Delta l = \bar{l}_i - l_0,$$

где  $\bar{l}_i$  - среднее значение длины ЗКС по трём измерениям;

$l_0$  - первоначальная длина ЗКС, взятая из формуляра орудия или из инструкции по категорированию.

В табл. 1 приведены абсолютные и относительные величины удлинений ЗКС отобранной из [2] совокупности артиллерийских орудий. Если значение  $\Delta l$  больше величины, установленной при дефектации, то ствол для стрельбы не допускается.

Ещё одним применением информации о значении величины  $\Delta l$  является определение падения начальной скорости снаряда  $\Delta v_0$ . Ее инструментальная оценка производится при невозможности определения начальной скорости с использованием артиллерийской баллистической. Анализ приведённых в табл. 1 данных показывает, что удлинение ЗКС, относительно ее первоначальной длины составляет 3,77 - 80,73%.

**Таблица 1**

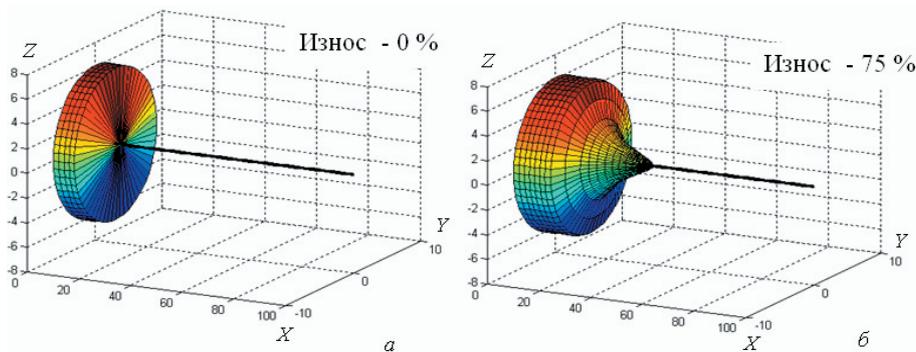
**Значения абсолютных и относительных величин удлинения ЗКС**

№ пп	Наименование артиллерийского орудия	Расчётная длина камеры, мм	Удлинение камеры, для дефектации, мм	Длина нарезной части, мм	Удлинение камеры, относительно	
					ее длины, %	длины нарезной части, %
1	76-мм пушка ЗИС-3 обр. 1942	398	15	2587	3,77	0,58
2	122-мм гаубица Д-30	594	113	3400	19,02	3,32
3	130-мм пушка М-46 обр. 1953	991	800	5860	80,73	13,65
4	152-мм гаубица Д-1 обр. 1943	410	100	3117	24,39	3,21

Длину ЗКС принято определять путём проведения прямого измерения механическим способом. Для этого, как правило, используется измерительный диск заданного диаметра, закреплённый на штанге, которая вставляется в канал ствола с казённой части. Такой прибор в вооружённых силах СССР получил название прибора измерения длины зарядной камеры или сокращённо ПЗК. Разница в конструкции этого прибора, используемого в сухопутных войсках и военно-морских силах, заключается в том, что в стволы полевой артиллерии контролируются одним диском, а стволы корабельной артиллерии их набором (2-6 мерительных дисков). Механические приборы, используемые за рубежом, например, в ВМС США функционируют по аналогичной схеме.

Традиционно износ ствола фиксируется таблично [1] и изображается в виде зависимости изменения диаметра ЗКС от расстояния от казённого среза [6]. В работе [1] предложен вариант трёхмерной визуализации износа артствала. Такой подход базируется на использовании принципа сравнения повреждений ствола в зависимости от степени его износа. Однако трёхмерная гистограмма [1], хотя и показывает интенсивность нарастания повреждений в канале, но не даёт полного геометрического представления о их расположении в стволе. С этой точки его использование затруднит сравнение стволов артиллерийских установок разных типов.

Решить эту задачу позволяет переход к относительным единицам. Под ними понимается отношение фактического геометрического размера ЗКС или канала ствола к его калибру. При принятии допущения о симметричности процесса износа и используя трёхмерную визуализацию, износ ЗКС может быть представлен в виде фигуры вращения. На рис. 1 по оси X отложено отношение глубины камеры табличное (фактическое) к длине канала ствола и выраженное в процентах. Казённый срез ствола находится слева и ему соответствует отметка 0% (отметка 100% - дульный срез). По осям Z и Y отложен диаметр зарядной камеры, отнесённый к калибру боеприпаса. Таким образом, окружность с радиусом в 6% больше чем полукалибр орудия в промежутке 0-7% по оси X показывает, что средний диаметр гильзы на 6% больше калибра ствола. Чёрная горизонтальная линия соответствует участку условно не подверженному камерному износу. Фрагменты а, б (рис. 1) показывают размеры зарядной камеры при износе 0 и 75%. На фрагменте а при первоначальных (чертёжных) размерах ствола камера составляет 7% длины ствола. Увеличение процента износа до 75% приводит к увеличению объёма камеры и ее «продвижения» в направлении отметки 100% (дульный срез). Совместное использование относительных единиц позволяет сравнивать интенсивность процессов износа для разных артиллерийских систем, а трёхмерная визуализация отвечает требованию наглядности.



**Рис. 1. Развитие камерного износа ствола артиллерийской установки: а) при 0%, б) при 75%**

В качестве параметра, характеризующего работоспособность гладких стволов, в особенности стволов танковых (противотанковых) пушек, выбрано увеличение диаметра канала ствола («диаметральный» износ). Такое решение объясняется тем, что у таких стволов значительный износ зарядной камеры происходит

уже после нескольких выстрелов. Ввиду того, что гладкие стволы в основном используются для стрельбы прямой наводкой. В этой ситуации эффективность зависит от кучности, что вынуждает контролировать диаметр канала ствола.

#### 4. Обеспечение контроля износа гладких артиллерийских стволов

При обнаружении прогрессирующего диаметрального износа или асимметричного износа контроль ствола осуществляется с использованием нутромеров, которые в артиллерии получили название «звездок». Измерительные «звездки» позволяют производить контроль увеличения диаметра в горизонтальной (вертикальной) плоскостях или при произвольном угле. Возможно использование «звездок» при контроле диаметрального износа и в нарезных стволах, однако в этой ситуации необходимо избегать неоднозначности, связанной с контролем износа или только по полям нарезов или только по нарезам.

Примером штатного прибора измерения диаметрального износа является прибор контроля износа (ПКИ), который представляет собой вид механического нутромера с двухточечной измерительной базой [1].

Фотография американского универсального прибора контроля износа каналов артиллерийских стволов, основанного на принципе контактного механического измерителя, приведена на рис. 2.



Рис. 2. Механический прибор контроля износа каналов стволов (США)

Обработка многолетних наблюдений за разрушением стволов используемых в войсках артиллерийских системам позволила определить так называемые «контрольные» точки, то есть точки ствола, наиболее адекватно передающие тенденции протекания процесса износа.

Такой подход позволил осуществить переход от обследования всей поверхности артиллерийского ствола

к определению характеристик ствола в контрольных точках.

Двумерное представление износа двух различных танковых стволов 125 мм гладкоствольной пушки представлено (рис. 3). Величины, отложенные по осям X, Y, Z, аналогичны тем, что приняты на предыдущем рисунке. Отличие заключается в том, что для достижения большей наглядности расположение казенного и дульного срезов (рис. 3) изменено по сравнению с рис. 1 на обратное.

Анализ изображений (рис. 3 а,б) показывает, что износ танкового ствола является сложным сочетанием камерного и собственно диаметрального износа. Он представляет собой смешанный вариант, поэтому требует исследования всей поверхности канала ствола.

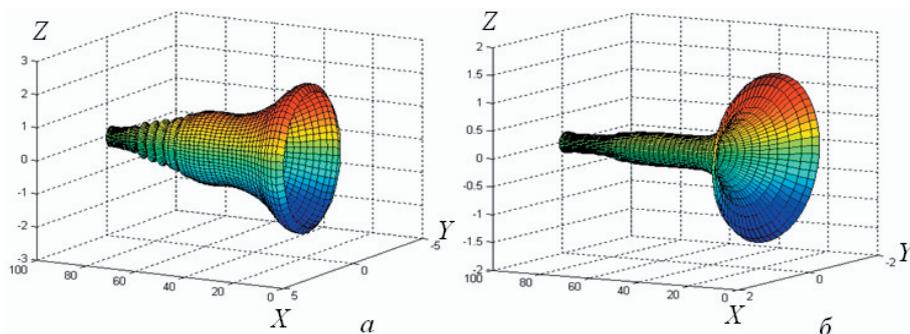


Рис. 3. Виды диаметрального износа канала ствола 125 мм танковой пушки

Используемые сейчас в целях определения степени износа (камерного, камерно-диаметрального) дисковые измерители, механические нутромеры «звездки» с одно-, двух- или трехбазным измерительным органом, воздушные измерители являются простыми и надёжными средствами, однако реализованная в них идеология прямого измерения, относящаяся к 50-м–60-м годам XX в., делает затруднительной или практически невозможной операцию исследования («картографирования») всей поверхности канала ствола вне зависимости от его типа орудия нарезного или гладкоствольного, а это затрудняет решение задачи оценки влияния геронтологических изменений в метательных взрывчатых веществах боеприпаса на живучесть орудийного ствола.

В условиях использования механических измерительных средств контроля износа приобретает значительный субъективный аспект, зависящий от квалификации оператора и особенностей использования измерительных средств. К тому же такие измерения характеризуются высокой трудоёмкостью и недостаточной точностью. Все это затормаживает их широкое использование в войсках. Одним из аспектов подтверждающим недостаточную адекватность данных, полученных с использованием современных нутромеров, является распространение приборов визуального (оптического) контроля, в основе которых лежит принцип эндоскопа [3]. Таким образом, существующее разделение инструментальных методов контроля нарезного и гладкого стволов, а так же камерного и диаметрального износа, основано на том, что в них заложен принцип прямых измерений механическими приспособлениями. Это свидетельствует о неразвито-

сти методов контроля канала ствола и не применении принципа сканирования его поверхности.

### 5. Сканирование поверхности ствола как новый подход к контролю его состояния

Одним из первых приборов, в конструкции которого реализован принцип косвенного измерения износа артиллерийских ствола является так называемый «воздушный» измеритель. Прибор представляет собой насос, подающий в канал ствола через штангу и измерительное кольцо с отверстием воздух заданных параметров. По изменению сопротивления воздушного потока в зазоре между кольцом и поверхностью канала ствола судят об изменении диаметра ствола. Наряду с тем, что данная измерительная схема использует принцип неконтактного (косвенного) измерения величины диаметра, в ней присутствует значительный недостаток, заключающийся в нечувствительности к ориентации несимметричного износа, т.е. к ориентации овала канала ствола.

Попытки автоматизации выполнения механических измерений и уменьшения времени, затрачиваемого на единичный замер, привели к разработке электро-механических приборов контроля износа ствола. Одним из представителей средств этого класса являются приборы ВГ10, ВГ20 [4]. С их использованием могут обследоваться стволы с калибрами 20-155 мм, при этом для 20-60 мм достигнута точность измерения ± 5 мкм, а для 61-155 мм ± 20 мкм. Оператор может вести измерения в двух режимах. В случае симметричного износа и раздутия ствола используется так называемый «нормальный» режим. Для асимметричного (неравномерного) износа предназначен режим «овал». При работе в нормальном режиме датчик автоматически вычисляет средний диаметр отверстия, а в режиме овала оценивается значение максимальной его полуоси. С использованием прибора ВГ20 нарезной ствол может контролироваться по полям или по нарезам.

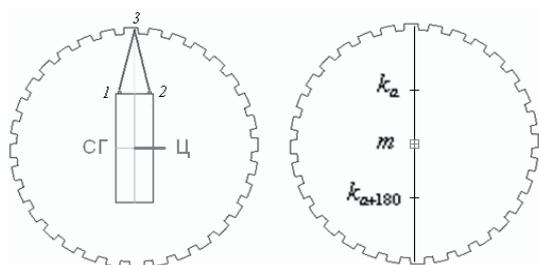


Рис. 4. Принцип лазерного сканирования поверхности канала артиллерийского ствола на примере нарезного ствола

Современные успехи в лазерной технике, приемах сканирования поверхностей, а также в компьютерной обработке измерений способствовали разработке альтернативного подхода к решению проблемы контроля состояния канала артиллерийского ствола.

Новый метод получил название лазерного сканирования поверхности канала ствола [5].

Сканирующая головка (СГ) прибора представляет собой вращающийся блок, содержащий в себе источник (позиция 1, рис. 4,а) и приёмник лазерного излучения (позиция 2, рис. 4,а). Находясь на некотором расстоянии от дульного среза, сканирующая головка при помощи механизма центрирования автоматически центрируется в артиллерийском стволе (Ц – центр). Далее начинается процесс измерения расстояния от излучающей (принимающей) лазерное излучение боковой поверхности СГ до поверхности ствола. Посылка лазерного излучения производится по трассе 1-3, отражение от поверхности (позиция 3, рис. 6,а), прием излучения прошедшего трассу 3-2). Такое измерение расстояния первоначально производится для произвольного угла  $\alpha$ .

Далее головка разворачивается на угол  $\alpha+180^\circ$  и производит ещё одно определение расстояния в противоположном направлении. Диаметр канала ствола ( $d$ ) определяется из соотношения (рис. 4,б):

$$d = k_a + k_{\alpha+180} + m,$$

где  $k_a$  – расстояние от головки до поверхности канала при угле  $\alpha^\circ$ ;

$k_{\alpha+180}$  – расстояние от головки до поверхности канала при угле  $\alpha+180^\circ$ ;

$m$  – ширина измерительной головки.

Таким образом, совершая  $180/\Delta b$  измерений расстояния до поверхности канала и поворотов в диапазоне углов  $0-180^\circ$  и такое же количество измерений и поворотов в диапазоне углов  $180-360^\circ$ , получим  $180/\Delta b$  диаметров канала.

Если  $\Delta b$  равно  $1^\circ$ , то получается 180 измерений диаметра канала ствола.

Выполнив заранее рассчитанное для данного калибра ствола количество измерений расстояния и поворотов вокруг своей оси, головка собирает информацию о диаметрах первого аксиального «среза». Далее совершая поступательное движение, вглубь канала ствола, СГ производит новый «срез» и так далее до ее входа в зарядную камеру орудия. Значительная разрешающая способность по углу и дальности даёт возможность реконструировать плоскостные и трёхмерные поверхности, характеризующие исследуемый ствол, вне зависимости от наличия или отсутствия нарезов. Одним из примеров постобработки данных сканирования поверхности нарезного ствола [5] с использованием системы MatLab приведён на рис. 5. На нем представлены четыре фрагмента характеризующие состояние начала нарезной части.

Фрагменты а и в (рис. 5) показывают состояние шести нарезов, полученное с интервалом в 20 выстрелов. Нумерация нарезов приведена в квадратах. Скат, расположенный на переднем плане, представляет собой переходной цилиндр от зарядной камеры к нарезной части.

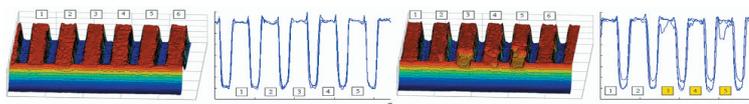


Рис. 5. Результат постобработки данных лазерного сканирования нарезного ствола: а), б), в), г) – фрагменты поверхности нарезного ствола

На реконструированных фрагментах а, в (рис. 5) хорошо видны все параметры нарезки: ширина, ширина поля, его глубина.

Каждый из двух фрагментов б, г (рис. 5) показывает три двумерных «срезы», полученные сечением изображений (а, в) параллельными плоскостями. Отрицательное действие выстрелов на нарезки выражается в виде сплющивания их кромок, начальной стадии разрушения нарезок №3 и №5 (фрагмент в, рис. 5).

Высокоинформативная техника лазерного сканирования ствола для оценки влияния боеприпаса на ствол (в частности боеприпаса, подвергнувшегося геронтологическим изменениям), позволяет контролировать следующие 11 параметров: среднюю ширину нарезки по его номеру; усреднённое значение средней ширины нарезок; среднюю ширину поля нарезки по его номеру; усреднённое значение среднего поля нарезок; среднюю глубину нарезки по его номеру; усреднённое значение глубины нарезок; диаметр канала ствола по нарезкам с номерами; усреднённое значение диаметра по нарезкам; диаметр канала ствола по полям нарезок с номерами; усреднённое значение диаметра ствола по полям нарезок; общую площадь аномального износа; площадь и глубину трещины.

Выше приведённая совокупность параметров позволяет накапливать статистические данные по особенностям влияния боеприпаса (боеприпасов) на ствол, группу однотипных стволов.

В виду того, что технология лазерного сканирования позволяет проводить его в промежутках между выстрелами, а разрешающая способность датчика способна выявить изменения поверхности ствола после каждого очередного выстрела, сканирование можно использовать как средство неразрушающего контроля и оценки падения начальной скорости боеприпаса.

## 6. Выводы

1. Использование механических средств контроля состояния каналов ствола, основанных на ведении прямых измерений, а также потребность в снижении трудоёмкости работ по обследованию стволов, вызвало дифференцирование методов оценки состояния гладких и нарезных стволов.

2. Условное разделение видов износа на каморный и диаметральный, ранее продиктовано недостаточной развитостью измерительных средств и попыткой снижения объёма измерительных данных необходимых для оценки состояния.

3. С использованием механических средств контроля на данный момент ситуацию параллельного существуют две разновидности оценки износа стволов: по глубине продвижения диска (группы дисков) в зарядную камору и по диаметральному износу ствола.

4. Тенденция использования высокоэнергетических порохов, ужесточения режимов стрельбы и условий эксплуатации артиллерийских установок, влияние процессов старения боеприпасов приводят к усложнению морфологии износа, который в этих новых условиях приобретает смешанную форму каморно-диаметральной эрозии.

5. Основными тенденциями развития средств контроля является переход от механических средств измерения к электромеханическим и лазерным сканирующим средствам, которые способны обеспечить точность измерения внутреннего диаметра ( $\pm 5$  мкм).

6. Трёхмерная визуализация данных совместно с использованием относительных величин позволяет сравнивать интенсивность износа стволов различных артиллерийских установок между собой и отвечает принципу наглядного представления данных.

## Литература

1. Живучесть нарезных и гладких стволов при использовании боеприпасов послегарантийных сроков хранения. [Текст] / О.Б.Анипко, Ю.М.Бусяк, П.Д.Гончаренко, В.Л.Хайков. – Севастополь: Академия военно-морских сил им. П.С. Нахимова, 2012. – 208 с.
2. Салуквадзе К.В. Теоретические основы эксплуатации артиллерийского вооружения. [Текст] / К.В.Салуквадзе, В.Г.Староселец, В.Н.Чухнин. – М.: Военное издательство, 1985. – 414 с.
3. Гончаренко, П.Д. Современные средства контроля износа канала орудийного ствола. [Текст] / П.Д.Гончаренко, В.Л.Хайков. // Збірник наукових праць академії військово-морських сил ім. П.С. Нахімова, –2012., №1(9), – С. 22 – 30.
4. AGI Aeronautical & General Instrument Ltd. [Электронный ресурс] – Режим доступа: [http://www.agiltd.co.uk/barrel\\_care\\_solutions/bore\\_gauge\\_bg10](http://www.agiltd.co.uk/barrel_care_solutions/bore_gauge_bg10).
5. 155mm self-propelled laser MicroMap. Laser-based NDT and QC systems. [Электронный ресурс] – Режим доступа: [www.laser-ndt.com](http://www.laser-ndt.com).
6. Анипко, О.Б. Живучесть стволов корабельных артиллерийских установок и геронтологические изменения свойств взрывчатых веществ артбоеприпасов. Обзор. Часть 1. [Текст] / О.Б. Анипко, П.Д. Гончаренко, В.Л. Хайков // Збірник наукових праць академії військово-морських сил ім. П.С. Нахімова. 2011. №3(7), – С. 38 – 51.