

ПРИМЕНЕНИЕ ИЗНОСОСНИЖАЮЩИХ ДОБАВОК В МЕТАТЕЛЬНОМ ЗАРЯДЕ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЖИВУЧЕСТИ Артиллерийских ствол

М.В. Басова¹, Е.С. Иванова², Д.Ю. Латышев³, В.С. Сивко⁴, Е.Н. Моисеев⁵

Рассмотрены основные факторы, влияющие на живучесть артиллерийских стволов и дан обзор износоснижающих добавок, размещаемых в метательном заряде. Описаны перспективные вкладные защитные элементы на основе микрокапсулированных составов.

Ключевые слова: разгарно-эрозионное действие, канал ствола, износ, метательный заряд, износоснижающие добавки, микрокапсулирование.

1 История становления представлений о живучести артиллерийских стволов и влияющие на нее факторы

После массового внедрения в артиллерию бездымных порохов взамен дымного, была обнаружена существенная проблема их применения – разгар канала ствола орудия. Первые признаки разгара обозначались в появлении матовых пятен на полированной поверхности канала. При дальнейшей эксплуатации орудия на канале появлялась сетка тонких продольных и поперечных трещин. По мере использования орудия отдельные трещины удлинялись, увеличивалась их глубина и ширина [0, с. 152-153]. Постепенно по причине износа объем зарядной камеры увеличивался, вызывая падение начальной скорости [2, с. 340]. После определенного числа выстрелов начинала заметно понижаться кучность стрельбы, затем ствол становился непригодным для использования.

В частности, в период англо-бурской войны 1899-1901 года англичане за короткий срок вывели значительную часть своей артиллерии после начала применения кордитного пороха М1 (с 58 % нитроглицерина), что побудило их перейти на использование пороха МД с меньшим содержанием нитроглицерина (30 %). [2, с. 340].

В дальнейшем стало очевидным, что проблема износа КС, особенно для орудий среднего и крупного калибра, является существенным фактором.

Одним из первых вклад в обоснование процесса износа артиллерийских стволов внес Д.К. Чернов. В 1912 г. в своей работе "О выгорании каналов в стальных орудиях" [3] им, было замечено, что матовые места на внутренней поверхности ствола, образующиеся в начале разгара, зависят от появления сетей из чрезвычайно тонких, очень неглубоких трещинок, которые начинают увеличиваться по мере продолжения стрельбы. При дальнейшем применении выстрелов глубина и ширина трещинок продолжает увеличиваться. По расположению, направлению и характеру повреждений внутренних поверхностей стволов, Д.К. Чернов пришел к выводу, что главной причиной износа является высокая температура горения пороха. Тонкий поверхностный слой стенок КС в процессе выстрела быстро нагревается, стремится расширяться. В результате возникших напряжений на внутренней поверхности появляются трещины. Кроме того, Д.К. Чернов признавал, что механическое действие газов и снаряда на стенки ствола влияют на износ, однако их воздействие не относил к преобладающим.

¹Басова Мария Владимировна – ведущий инженер отдела «Живучесть», e-mail: basova9590810@mail.ru;

²Иванова Елена Сергеевна – кандидат наук, генеральный директор АО «ЦНИИМ»;

³Латышев Денис Юрьевич – начальник отдела «Живучесть», тел.: (812) 578-91-41 e-mail: crim3lab@yandex.ru;

⁴Сивко Владимир Сергеевич – заместитель начальника «Живучесть», e-mail: sivko@cniim.com;

⁵Моисеев Евгений Николаевич – начальник сектора отдела «Живучесть», e-mail: moiseev_evgen@inbox;

Поэтому первоочередной задачей он видел в необходимости разработки порохов, обеспечивающих требуемые баллистические качества, но обладающие более низкой температурой горения. Так, для снижения действия теплоты на поверхностный слой металла начался поиск порохов с более низкой температурой горения. Кроме того, прорабатывались вопросы по снижению калорийности порохов за счет введения инертных добавок (вазелин, централит, дибудилфталат) [2, с. 343]. Уделялось внимание степени воздействия тех или иных типов порохов на износ.

Для борьбы с механическим воздействием пороховых газов на основании опытов была доказана эффективность обтюраторов (изготавливаемых в форме чашечек из достаточно жесткого картона), вкладываемых в гильзу. Применение обтюраторов было особенно важно для выстрелов унитарного заряжания, т.к. в случае значительного износа КС, снаряд унитарного выстрела не упирался в нарезы, в результате чего в начальный момент времени возникал сильный прорыв пороховых газов. Кроме того, для недопущения прорыва пороховых газов начали применять обмазку ведущих поясков специальной мазью, заполняющей зазоры, параллельно смазывающей канал. [0, с. 154]. К зарядам некоторых орудий (например, в 122-мм пушке обр. 1931 г.) применялись паковые просальники. Указанные изделия состояли из аналогичного вышеописанному обтюратору, к выгнутой части которого был прикреплен специальный цилиндрический контейнер со смазкой. Просальник при зарядании надвигался на запоясковую часть снаряда. При выстреле он разрушался, а смазка наносилась на поверхность канала, уменьшая при этом разгар [4, с. 30-31].

По мере увеличения тактико-технических характеристик артиллерийских систем (начальной скорости снаряда, скорострельности и дальности стрельбы) актуальность проблемы износа (ухудшения состояния КС) только возрастала, поэтому одним из наиболее значимых показателей, характеризующих боевую эффективность артиллерийской системы стала живучесть ствола.

Под живучестью ствола понимается

количество выстрелов, произведенных из орудия в пределах его огневой эксплуатации, при котором обеспечивается выполнение требований тактико-технического задания по сохранению баллистических параметров до выбраковки ствола по установленным критериям [5].

Живучесть стволов артиллерийских систем оценивается по следующим критериям [6, с. 65-68.]:

1) падение начальной скорости снаряда, которому соответствует снижение максимального давления пороховых газов при выстреле;

2) наблюдаемое три раза подряд восьмикратное увеличение площади рассеивания;

3) регулярное невзведение инерционного взрывателя при стрельбе наименьшим зарядом;

4) систематическое срезание ведущего пояска (для нарезного ствола) или демонтаж оперенного подкалиберного снаряда (для гладкостенного ствола);

5) увеличенная овальность пробоин при стрельбе по щиту.

Исследования по изучению износа и живучести, одним из основоположников которой был Д.К. Чернов, проводились рядом зарубежных (Шарбонье, Юстров, Габо, Линте и др.) и советских ученых (А.Ф. Головин, В.Н. Константинов, В.Е. Слухоцкий и др.) [7, с. 187]. Особенно стоит отметить полученные в рамках выполнения НИР и ОКР в СССР и в России в специализированных НИИ результаты исследований и технические решения по соответствующей тематике.

В результате проведенных работ ученые подошли вплотную к созданию физически обоснованной, математически строгой и одновременно обладающей большой степенью универсальности теории износа и живучести артиллерийских стволов среднего и крупного калибров [7, с. 187].

Падение живучести, в первую очередь, обусловлено износом внутренней поверхности КС, влияющего на баллистические характеристики, приводя к падению начальной скорости снаряда, дальности, кучности и точности стрельбы [8].

В соответствии с современными



представлениями, на ухудшение состояния КС влияет большое количество факторов, к наиболее значимым из которых относятся: разгарно-эрозионное действие (совокупное термохимическое и эрозионное воздействие продуктов горения пороха метательного заряда (далее – МЗ)), механическое воздействие ведущих элементов снаряда и абразивный износ, вызываемый частицами – остатками горения МЗ.

Наибольшее влияние на процесс износа КС оказывает обусловленное высокой термической нагрузкой разгарно-эрозионное действие (далее – РЭД). По причине небольшого времени воздействия и высоких температур, изменение температуры поверхности ствола носит пиковый характер – полученное тепло не успевает распространиться посредством теплопроводности вглубь материала ствола и остается в его поверхностном слое, где происходит значительный перегрев, приводящий к полиморфным превращениям стали. Оксиды, образовавшиеся при горении порохов, взаимодействуя с материалом ствола, вызывают частичное окисление поверхностного слоя.

Горячие газы уносят часть окисленного и оплавленного материала ствола, оставляя чистую поверхность, которая становится еще более подвержена эрозионному износу. Из-за термической усталости на поверхности КС образуется сетка трещин, что усиливает РЭД газов [9].

Ввиду условий протекания процесса износа КС современных и перспективных артиллерийских систем, эффективное решение проблемы обеспечения живучести стволов должно носить комплексный характер и состоять из мероприятий по МЗ, снаряду и стволу [8].

2 Применение износоснижающих добавок в составе МЗ

Одним из таких мероприятий по МЗ является применение износоснижающих добавок. Стоит отметить, что результаты подобных исследований из соображений неразкрытия коммерческой тайны всегда носят закрытый характер и в России и за рубежом. Однако, согласно зарубежным патентам, а также некоторым публикациям можно проследить ряд тенденций.

В настоящее время в качестве мероприятий по снижению износа КС, относящихся к МЗ, одним из традиционных способов обеспечения живучести штатных полевых и корабельных систем является применение флегматизаторов. Флегматизаторы могут быть различных типов и конструкций в зависимости от выстрела и представляют собой смесь предельных углеводородов (взятых в различных пропорциях), нанесенных на бумажную или иную основу. В указанную смесь могут быть включены специальные добавки, повышающие эксплуатационные характеристики и износоснижающие свойства. Часто в литературе подобный состав либо флегматизатор из него с добавлением диоксида титана часто фигурирует под названием "шведская добавка" [10, с. 14].

Флегматизатор располагается по периферии МЗ. В процессе срабатывания МЗ, флегматизатор разлагается под действием температуры образовавшихся газов, образуя при этом по периферии ствола слой более холодных газов. Опытным путем доказано, что применение флегматизаторов способствует увеличению живучести до 4 ... 5 раз [7, с. 206] по сравнению с выстрелом без использования флегматизатора. По такому пути повышения живучести пошли во многих зарубежных странах, в связи с чем в 90-е годы и в начале 2000-х было выпущено множество патентов описывающих подобные составы или способы их введения в МЗ [11], [12], [13], [14].

Еще одним традиционным методом повышения живучести является введение в МЗ дисперсных неорганических добавок (диоксид титана, диоксид кремния, тальк и другие). В большинстве случаев принцип действия таких добавок заключается в образовании в процессе выстрела на КС слоя тугоплавких окислов (50 ... 60 мкм), защищающих КС за счет меньшей теплопроводности чем оружейная сталь [7, с. 206]. Этот способ тоже получил широкое применение за рубежом, о чем свидетельствует ряд патентов [15], [16], [17].

В некоторых случаях предлагается использование так называемых авторами "нанокompозитных добавок" [18], представляющей собой композит, содержащий частицы металла, оксида металла с

полимерными связующими.

В ряде случаев предлагается введение нитрида бора непосредственно в порошковые МЗ [19], [20].

Кроме того, ряд исследователей и фирм предлагает введение специальных триботехнических составов, направленных на снижение износа благодаря созданию изолирующего слоя или проникновения составов в трещины для улучшения состояния поверхности КС.

На сегодняшний день большая часть износоснижающих добавок в составе МЗ представляет собой одну или комбинацию из нескольких вышеперечисленных групп вариантов. Каждый из них показал свою эффективность в процессе испытаний, проведенных в СССР, затем в России и зарубежных странах. Имеется колоссальный опыт по различным вариантам их размещения и по подбору наиболее эффективных композиций. Однако, при разработке перспективных артиллерийских систем с повышенными тактико-техническими характеристиками по скорости, дальности и скорострельности становится необходимым применение высокоэнергетических порохов (далее – ВЭП), что несомненно усложняет обеспечение живучести.

3 Перспективные вкладные защитные элементы на основе микрокапсулированных составов

Возможности снижения РЭД посредством применения традиционных износоснижающих добавок не могут использоваться в полной мере, так как их защитное воздействие снижается по мере удаления по оси КС в сторону дульного среза. Поскольку максимальная интенсивность воздействия снижающих живучесть факторов приходится на различные по длине участки ствола и на разные временные периоды выстрела, а также необходимость применения ВЭП делают традиционные износоснижающие добавки недостаточно эффективными для обеспечения живучести вновь разрабатываемых артиллерийских систем.

Одним из наиболее целесообразных вариантов решения данной проблемы является разработка и внедрение вкладных защитных элементов (далее – ВЗЭ) нового

поколения на основе микрокапсулированных составов.

Микрокапсулирование, как самостоятельная отрасль химической технологии возникло в середине 20-го века [21, с. 5]. Перспективность этого технологического направления с момента его появления не вызывает сомнений, поскольку позволяет получать из привычных материалов продукты, способствующие достижению качественно новых эффектов. Микрокапсула – это мелкая частица вещества (защитный состав), заключенная в тонкую оболочку пленкообразующего материала.

В настоящее время микрокапсулирование широко используется в России и за рубежом в различных областях благодаря и, в зависимости от поставленных задач, позволяет: снижать реакционную способность веществ, удлинять сроки хранения неустойчивых веществ, уменьшать вредное воздействие на организм человека и многое другое.

Вопрос применения микрокапсулированных составов в качестве износоснижающих добавок в последние годы стал активно изучаться несколькими китайскими организациями, о чем свидетельствуют некоторые публикации.

В частности, группой ученых из Колледжа информатики и инженерии в г. Шичзянжуан были описаны микрокапсулы из силиконового масла с оболочкой из карбамидоформальдегидной смолы [23]. Данные микрокапсулы рассматриваются как вводимая в МЗ добавка для снижения износа КС. Термогравиметрический анализ полученных микрокапсул показал, что наибольшая потеря массы при нагреве приходится на температуру 275 °С. При этом начало незначительной потери массы микрокапсул начинается только при 150 °С.

Нанкинский университет науки и технологий также проводит работы по поиску новых износоснижающих добавок в МЗ на основе микрокапсулирования. В ряде публикаций описываются микрокапсулы из силиконового масла с оболочкой из полистирола, с добавленными в неё наноразмерными TiO_2 и Si_3N_4 для повышения термостабильности [24]. В настоящее время ведется подбор параметров микрокапсул, уже получены микрокапсулы со средним диаметром



10 ... 20 мкм и разложением основной массы микрокапсул при температурах 350 ... 470 °С. При этом температура начала разложения применяемого силиконового масла составляет 218,8 °С. Имеются результаты испытаний микрокапсул из силиконового масла на модельной установке, с применением ВЭП в качестве МЗ [25].

Взвешивание сменных лейнеров после испытаний показало, что эффект снижения износа увеличивается по мере увеличения общей массы добавляемых микрокапсул. Наилучший эффект снижения износа – 20,6 % был получен при добавлении микрокапсул в количестве 7 % от массы МЗ. Однако значительный положительный эффект наблюдался и при меньшем количестве микрокапсул. При добавлении 1, 3 и 5 % микрокапсул от веса МЗ, было получено снижение износа по сравнению со стрельбой без микрокапсул, на 8,3, 16,4 и 19,7 %, соответственно.

Интерес к применению микрокапсулированных материалов в качестве износоснижающих добавок продолжает расти, о чем свидетельствуют другие работы в этой области [26], показывающие широкие перспективы этого направления.

АО "ЦНИИМ" совместно с ФГУП "РНЦ "Прикладная химия" были разработаны состав и конструкция ВЗЭ на основе микрокапсулирования углеводородных продуктов (МИК). В данном случае микрокапсула представляет собой нефтепродукт (НП) в оболочке из полимерного материала. Применение МИК делает возможным регулирование скорости разложения защитного состава ВЗЭ, что выгодно отличает эту разработку от других защитных добавок. Начало воздействия ВЗЭ может быть направлено на наиболее подверженный износу участок КС посредством выбора материала оболочки, находящего в ней состава, соотношения состава и оболочки, размера микрокапсул. Еще одним преимуществом МИК является их мгновенное разрушение с резким увеличением поверхности испарения, и, как следствие, практически мгновенное разложение всего количества защитного состава на определенном участке КС. Также стоит учитывать, что в одном ВЗЭ можно сочетать различные МИК, соответственно, с

различным временем срабатывания, таким образом влияя на разные участки КС.

Технология изготовления данных микрокапсул основана на диспергировании жидких углеводородов в водном растворе полимера, в процессе которой образуется ядро с защитным составом, формируется и отверждается полимерная оболочка микрокапсулы. Затем полученные микрокапсулы подвергаются промывке и сушке. В целом благодаря развитию техники технология микрокапсулирования считается относительно простой, однако в каждом конкретном случае имеются свои особенности. Однако в первую очередь разработанная технология должна обеспечивать получение МИК с установленными в тактико-техническом задании на МЗ эксплуатационными характеристиками по сохраняемости, стойкости к внешним воздействиям и прочим характеристикам. Таким образом конструкция МИК должна обеспечивать должную диффузионную проницаемость оболочки для надежного запирания состава-наполнителя во всем диапазоне температур эксплуатации МЗ, а также с учетом гарантийных сроков хранения МЗ, воздействия сборки, транспортировки и прочих условий.

Термогравиметрические исследования нескольких конструкций МИК (отличавшихся различными составами-наполнителями, имеющими температуру кипения от 49 до 370 °С) показал, что разложение оболочки начинается после 200 °С. При этом на температуру зоны вскрытия микрокапсул влияли: состав-наполнитель, толщина стенки и размера микрокапсул.

В ходе проведения исследований АО "ЦНИИМ" из МИК были изготовлены несколько вариантов ВЗЭ в виде пластин. Для надежного размещения МИК пластины формировались с полимерного связующего и пластификатора.

Предварительные испытания полученных ВЗЭ, состоявшие в многократном циклическом термостатировании в диапазоне температур от минус 50 до плюс 50 °С с выдержкой при температуре минус 60 и плюс 60 °С показало высокую стойкость МИК и отсутствие переноса состава-наполнителя МИК на элементы МЗ. Кроме того, были отмечены удовлетворительный

внешний вид ВЗЭ и отсутствие изменения в процессе испытаний его массы.

Стоит отметить, что рядом организаций ранее проводились исследования по использованию жидких веществ в МЗ в качестве снижающих РЭД добавок. Обычно данные вещества размещались в МЗ в пакетах или пластиковых капсулах [22]. Однако такое размещение влекло за собой риск ухудшения горения пороха МЗ, так как пакет мог порваться в процессе эксплуатационных испытаний, а его наполнитель попасть на элементы МЗ. Применение новых ВЗЭ на основе МИК решает эту проблему и позволяет вводить в МЗ в качестве износоснижающих добавок ранее широко не применявшихся жидких веществ.

АО "ЦНИИМ" были проведены сравнительные испытания на модельных установках 7,62 и 30 мм по оценке

эффективности ВЗЭ из МИК в уменьшении износа КС. При этом в качестве МЗ использовался ВЭП [5].

На рисунке 1 приведены результаты сравнительных испытаний на модельной установке 7,62 мм, а на рисунке 2 – на модельной установке 30 мм. Сравнительные испытания показали, что ВЗЭ с МИК эффективнее снижают износ КС в 1,5 ... 2 раза по сравнению с ВЗЭ на основе предельных твердых углеводородов той же массы (состав и конструкция которого аналогичны одному из применяемых в штатной системе флегматизаторов). При этом стоит отметить, что в процессе испытаний на крупнокалиберной артиллерийской системе могут быть получены значительные результаты за счет срабатывания МИК на определенном участке КС.

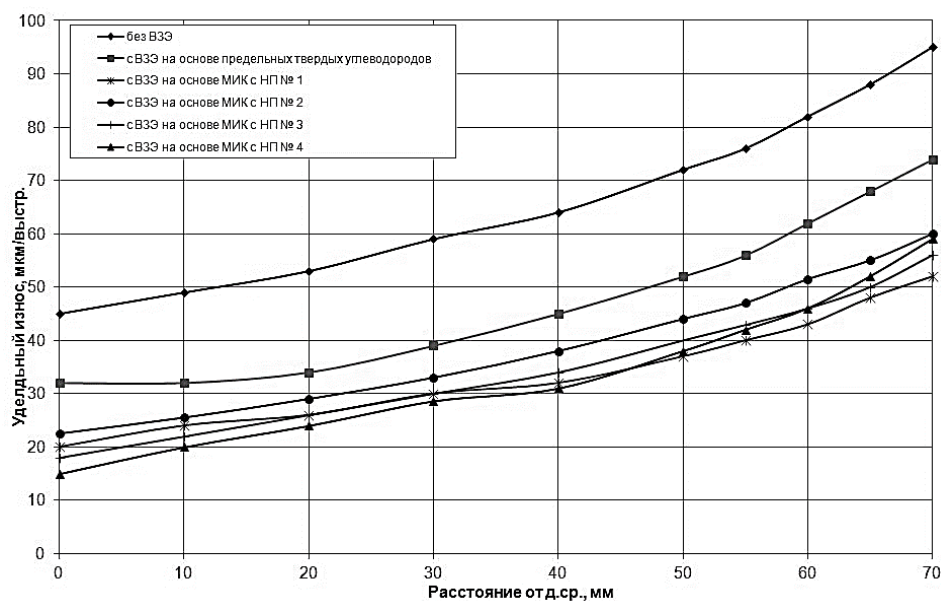


Рисунок 1 – Влияние ВЗЭ с МИК на износ лейнера модельной установки 7,62 мм

В ходе модельных испытаний на установках 7,62 и 30 мм АО "ЦНИИМ", проводилась оценка эффективности МИК в тканевых патронах, при этом в МЗ использовался штатный пироксилиновый порох ($T_r = 2800 \dots 2900$ К). В результате этих испытаний были отобраны наиболее перспективные МИК, которые были поставлены для проведения натурных испытаний на крупнокалиберной

артиллерийской системе. Размещение МИК также было выполнено в тканевых патронах. Результаты испытаний приведены на рисунке 3.

Анализ результатов испытаний показал, что МИК в тканевых патронах многократно снижают РЭД, в частности удельный диаметральный износ в начале направляющей части уменьшился в 3 ... 5 раз по сравнению с использованием штатного



флегматизатора. При этом происходит значительное уменьшение протяженности зоны износа, о чем свидетельствует график на рисунке 3. В отличие от штатного

флегматизатора, МИК срабатывал с некоторой задержкой и в крайне короткие сроки, оказывая большее воздействие на снижение износа КС.

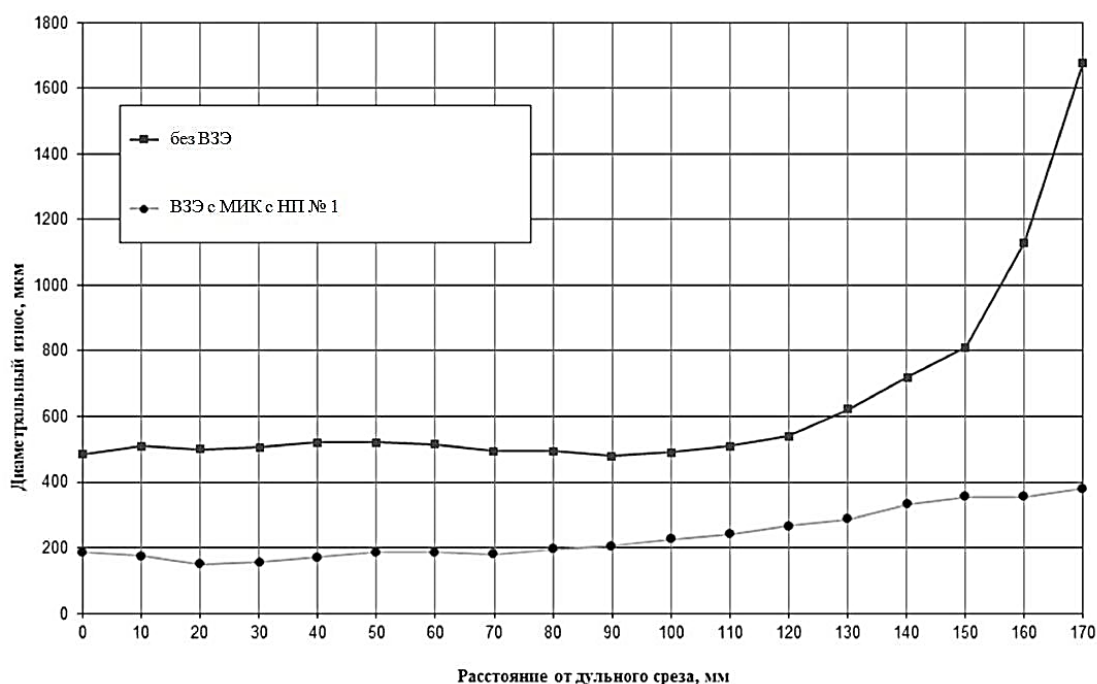


Рисунок 2 – Влияние ВЗЭ на основе МИК с НП № 1 на износ лейнера модельной установки 30 мм

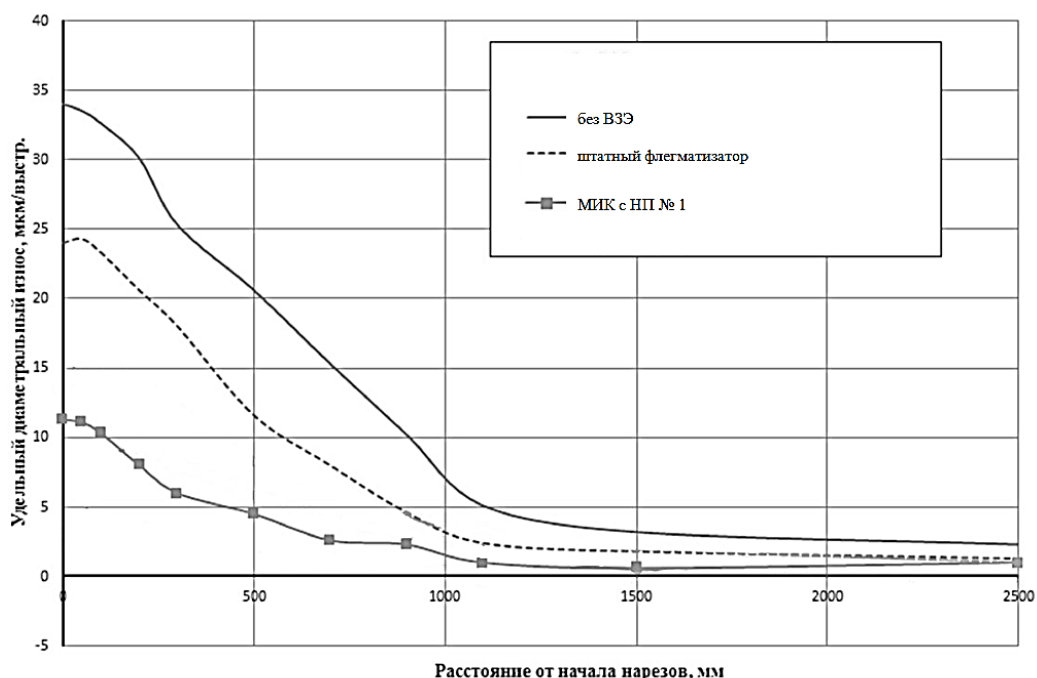


Рисунок 3 – Результаты сравнительных натурных испытаний МИК и штатного флегматизатора

В настоящее время микрокапсулирование продолжает охватывать новые сферы применения за счет относительно простой и

недорогой технологии исправления микрокапсул, а также придания микрокапсулированным материалам новых свойств.

Заключение

Износ стволов артиллерийских систем является процессом, протекающим под действием большого количества факторов, преобладающим из которых для орудий среднего и большого калибра является разгарно-эрозионное действие пороховых газов на значительном (до половины длины) участке КС. Применение ВЭП требует применения более эффективных мероприятий по повышению живучести, в качестве одного из которых выступает введение ВЗЭ с МИК в состав МЗ. Проведенные термоциклические, модельные и натурные испытания ВЗЭ с МИК показывают их несомненную перспективность за счет способности МИК к практически к одновременному срабатыванию на наиболее подверженном износу участке КС, сокращая при этом протяженности зоны износа.

Список литературы

1. Пороха и взрывчатые вещества. Горст А.Г., — М., Государственное издательство оборонной промышленности, 1957, — 208 с.
2. Будников М.А., Левкович Н.Л., Быстров И.В., Сиротинский В.Ф., Шехтер Б.И. Взрывчатые вещества и пороха — М.: Государственное издательство оборонной промышленности, 1955. — 109 с.
3. Чернов Д.К. "О выгорании каналов в стальных орудиях" /Доложено в Собрании Русского Metallургического Об-ва 10-го Мая 1912 г./ С-Петербург, "Артиллерийский журнал" 1912 (перепеч.).
4. Никифоров Н.Н. Учебник сержанта артиллерии. Кн. 1 Стрелково-артиллерийская подготовка – Военное издательство народного комиссариата обороны, 1944. – 287 с.
5. Иванова Е.С., Богатырев С.А., Моисеев Е.Н. Эффективность применения микрокапсулированных нефтепродуктов как средства снижения разгарно-эрозионного действия пороховых газов // Актуальные проблемы защиты и безопасности: тр. XVII Всерос. научн.-практ. Конф. / РАРАН. – М., 2014.
6. Гвоздев А.Е., Гришин М.В., Самородский М.В., Морозов О.С. Формирование требований к живучести стволов артиллерийских систем, проблемные вопросы их обеспечения и пути решения – Военное обозрение. 2019. № 2 (6).
7. Зайцев А.С. Устройство и проектирование стволов артиллерийских орудий: учебник / А.С. Зайцев. – Старый Оскол: ТНТ, 2017. – 388 с.
8. Болкисев С.А., Иванова Е.С., Моисеев Е.Н. Проблемы обеспечения живучести стволов перспективных артиллерийских систем // Актуальные вопросы повышения живучести танковых и артиллерийских стволов. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2018. – 74 с.
9. Лепеш Г.В., Моисеев Е.Н. Оценка способов защиты поверхности металла от высокотемпературной эрозии // Техничко-технологические проблемы сервиса. – 2017. – №3(41). – С. 20–31.
10. Ian A. Johnston. Understanding and Predicting Gun Barrel Erosion. DSTO-TR-1757 – Australia, Published by Weapons Systems Division DSTO Defence Science and Technology Organisation, 2005. – 52 с.
11. Патент Франции № 2725510 (9411937) от 12.04.1996.
12. Патент США № 5747723 от 05.05.1998, F42B 05/00, приоритет заявка № 756863 от 26.11.1996.
13. Патент США № 5052304 от 01.10.1991.
14. Патент Канады № CA2186602C от 23.08.2005.
15. Патент Европейского патентного ведомства № EP1110927B1 от 24.11.2010.
16. Патент Европейского патентного ведомства № EP1227295B1 от 13.04.2005.
17. Патент Европейского патентного ведомства № EP1647538B1 от 12.02.2014.
18. Патент США № US9446994B1 от 20.09.2016.
19. Thelma Manning, Richard Field, Kenneth Klingaman, Michael Fair, John Bolognini, Robin Crownover. Innovative boron nitride-doped propellants. Defence Technology 12 (2016) 69–80.
20. Патент США № US8968827B2 от 03.03.2015.
21. Солодовник В.Д. Микрокапсулирование. – М.: Химия, 1980. – 216 с.
22. Патент США № US4203364A от 16.06.1980.
23. Li H. G., Lin S. S., Du S. G., Lin D. J. Preparation and Characterization of Silicone Oil/UF Resin Microcapsules as Erosion Inhibitor // Key Engineering Materials. – 2016. – №723. – С. 481–485.
24. Sun N., Xiao Z. Improvement of the thermostability of silicone oil/polystyrene microcapsules by embedding TiO₂/Si₃N₄ nanocomposites as outer shell // Journal of Materials Science. – 2017. – №52 (18). – С. 10800–10813.
25. Sun N., Xiao Z. Robust Microencapsulated Silicone Oil with a Hybrid Shell for Reducing Propellant Erosion. Propellants // Explosives, Pyrotechnics. – 2017. – 43(2). – с. 151–155.
26. Jun Yan, Shaosen Lin, Mingqiu Wang, Weipu Zhao. Preparation and Characterization of Metatitanic Acid/Urea-Formaldehyde Microcapsules as Wear-Reducing Additives // Propellants Explos. Pyrotech – 2020. – 45, с. 1–9.

