

ОХРАНА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

УДК 614.842.6:539.92

DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.21126157>

А. В. Чучина, К. С. Коломийцев

Государственное бюджетное учреждение

«Проектно-конструкторский технологический институт», г. Донецк

ПОВЫШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ НАДЁЖНОСТИ РОБОТОТЕХНИЧЕСКОГО СРЕДСТВА ПОЖАРОТУШЕНИЯ РТС 1956 ЗА СЧЁТ НАНЕСЕНИЯ АНТИФРИКЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ НА СОПРЯЖЕНИЯ АКСИАЛЬНО-ПОРШНЕВЫХ НАСОСОВ

В статье рассматривается проблема снижения надёжности аксиально-поршневых насосов, входящих в состав гидравлической системы робототехнического средства пожаротушения РТС 1956, при работе в условиях резких перепадов температур на местах ликвидации чрезвычайных ситуаций. Проанализировано влияние температурно-вязкостных характеристик рабочих жидкостей на режимы смазывания пары «поршень-цилиндр». С целью повышения износостойкости пары «поршень-цилиндр» предложен и теоретически обоснован метод нанесения комбинированного многослойного антифрикционного покрытия Ti-C-Mo-S/TiN при помощи магнетронного распыления с плазмогенератором. Приведены расчётные модели изменения коэффициента трения и интенсивности износа, результаты стендовых испытаний и данные по внедрению модифицированных насосов в состав РТС 1956. Испытания опытных образцов пары «поршень-цилиндр», изготовленных из стали 40Х, показали, что применение комбинированного покрытия способно снизить интенсивность износа в 35–40 раз, стабилизировать коэффициент трения в диапазоне от 0,018 до 0,035 при температурах от минус 30 °С до плюс 100 °С и повысить надёжность в 3,2 раза.

Ключевые слова: РТС 1956, робототехнический комплекс пожаротушения, аксиально-поршневой насос, переменные температуры, антифрикционное покрытие, трибология, износостойкость, гидравлическая система, технологический суверенитет

Для цитирования: Чучина, А. В. Повышение эксплуатационной надёжности робототехнического средства пожаротушения РТС 1956 за счёт нанесения антифрикционных покрытий на сопряжения аксиально-поршневых насосов / А. В. Чучина, К. С. Коломийцев // Вести Автомобильно-дорожного института = Bulletin of the Automobile and Road Institute. – 2026. – № 2(57). – С. 30–40. <https://doi.org/10.5281/zenodo.21126157>.

Введение

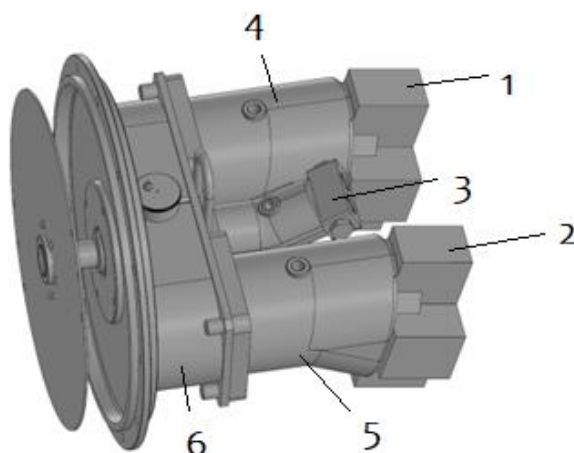
В условиях усложнения промышленной инфраструктуры, уплотнения городской застройки и роста частоты чрезвычайных ситуаций (ЧС) особую актуальность приобретает переход от традиционных методов ликвидации пожаров к интеллектуальным безлюдным технологиям. Разрабатываемое ГБУ «ПКТИ» при участии ГУ МЧС России по ДНР робототехническое средство пожаротушения РТС 1956 (рисунок 1) – это отечественное оборудование, способное работать в опасных зонах без непосредственного участия человека [1, 2].

Ключевым элементом ходовой части, системы управления водяной пушкой и механизмов разграждения выступает гидравлическая система, сердцем которой являются два аксиально-поршневых насоса (АПН). На примере опытной эксплуатации аналогичного оборудования выявлено, что работа АПН в составе РТС 1956 (рисунок 2) будет сопровождаться ускоренным износом пары трения «поршень-цилиндр» при воздействии переменных температур, характерных для реальных зон ЧС. Данный фактор снижает технологическую готовность комплекса, увеличивает затраты на обслуживание и создает риски отказа в критический момент.

Цель работы – научно обосновать метод повышения износостойкости аксиально-поршневых насосов, входящих в состав РТС 1956, за счёт формирования на поверхностях трения комбинированного антифрикционного покрытия Ti-C-Mo-S/TiN, способного стабилизировать трибологические характеристики в широком диапазоне температур и нагрузок.



Рисунок 1 – Робототехническое средство пожаротушения РТС 1956



1, 2 – поршневой регулятор насоса, 3 – управляющий насос, 4, 5 – рабочий насос, 6 – редуктор
Рисунок 2 – Насосный агрегат АПН в составе РТС 1956

Условия эксплуатации РТС 1956 и постановка трибологической задачи

Робототехнический комплекс РТС 1956 проектировался с учётом работы в экстремальных условиях: промышленные объекты, химические производства, нефтехранилища, а также зоны проведения специальных операций, где существует риск повторных огневых воздействий и радиоэлектронных помех. Температурный режим эксплуатации характеризуется следующими факторами:

- хранение и подготовка к выезду: от $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- работа в зоне ЧС: нагрев гидравлической системы до $90\text{--}110\text{ }^{\circ}\text{C}$ под нагрузкой;
- резкое охлаждение при распылении воды/пены или перемещении между зонами с разной температурой среды.

В РТС 1956 применяются АПН, работающие на гидравлических маслах классов вязкости VG 15 – VG 46. На основе актуальных экспериментальных исследований работы аналогичных АПН [3, 4] сделано заключение о том, что при температурах ниже минус $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ вязкость масла резко возрастает (до $300\text{--}450\text{ мм}^2/\text{с}$ для VG 32), что приводит к затруднению заполнения зазоров при запуске. При увеличении температуры выше плюс $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ вязкость падает до $12\text{--}18\text{ мм}^2/\text{с}$, гидродинамическая масляная пленка истончается, в результате чего наступает режим граничного или смешанного трения.

По истечении 500 моточасов работы АПН была проведена проверка состояния изношенных деталей насосов (поршня и цилиндра), которая показала:

- износ поршней – от 2 до 90 мкм (в среднем 22,5 мкм);
- износ цилиндров – от 4 до 88 мкм (в среднем 21,1 мкм);
- зафиксирован неравномерный износ с разбросом значений от 4 до 7 %, что указывает на неравномерное распределение нагрузок и локальное расположение зон с недостаточным смазыванием.

Результат износа при недостаточной смазываемости на сопряжении поршня с цилиндром приведен на рисунке 3.



Рисунок 3 – Результат износа при недостаточной смазываемости

Постановка задачи: обеспечить стабильное смазывание и минимизацию износа пары «поршень-цилиндр» АПН в диапазоне температур от минус 30 °С до плюс 100 °С без изменения конструктивных зазоров и марки применяемого масла, за счёт формирования на поверхностях трения функционального покрытия, сочетающего высокую твердость, адгезионную прочность и низкий коэффициент трения, что приведёт к снижению рисков для личного состава спасательных формирований и внесёт вклад в развитие техносферной безопасности.

Математическое моделирование температурно-вязкостных режимов

Для оценки изменения гидродинамических условий смазывания использована эмпирическая зависимость ASTM D341 [5, 6]:

$$\lg(\lg(v + 0,7)) = A - B \cdot \lg(T), \quad (1)$$

где v – кинематическая вязкость, мм²/с;

T – абсолютная температура, К;

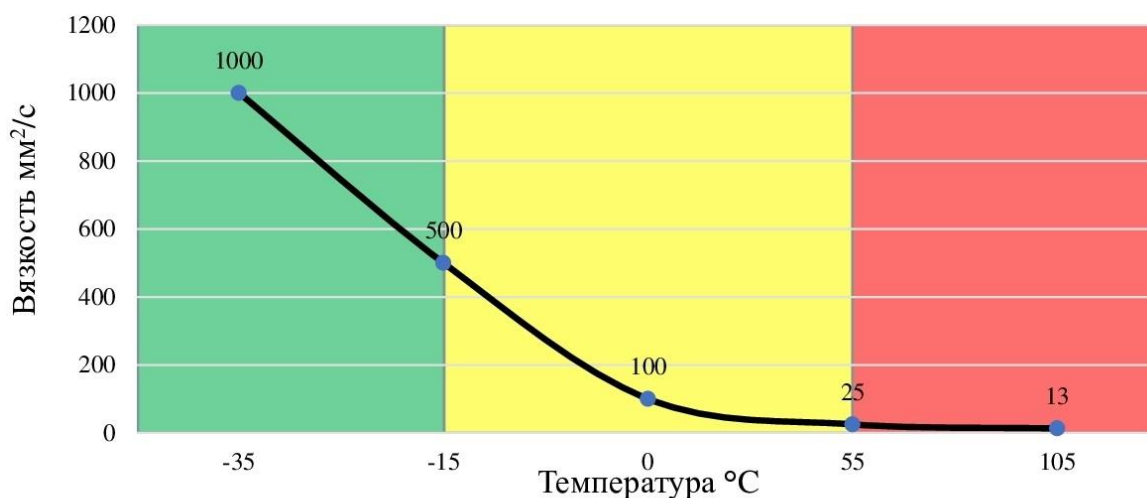
A, B – константы, определяемые экспериментально для конкретного масла.

Для масла класса VG 32 (HVLP-32), применяемого в РТС 1956, расчётные значения приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Зависимость вязкости масла VG 32 от температуры

№ п/п	Температура, °С	Вязкость, мм ² /с	Режим смазывания (при $n = 1500$ об/мин, $P = 25$ МПа)
1.	–30	412	Гидродинамический (пуск затруднён)
2.	–10	98	Смешанный
3.	+20	32	Гранично-смешанный (пуск)
4.	+60	16	Граничный
5.	+90	11	Сухое трение (локально)

В соответствии с данными таблицы 1 на рисунке 4 представлен график зависимости вязкости масла VG 32 от температуры, включая наложение зон режимов смазывания.



Зоны режимов смазывания: ● гидродинамический, ● смешанный, ● граничный

Рисунок 4 – График зависимости вязкости масла VG 32 от температуры

Характеристика режимов смазывания:

1) Граничный, при котором контакт трущихся поверхностей происходит через микронеровности. При этом толщина плёнки значительно меньше шероховатости, что характеризуется высоким коэффициентом трения (от 0,05 до 0,15).

2) Смешанный, при котором нагрузку воспринимают как трущиеся поверхности через микронеровности, так и через плёнку смазки. При этом трение резко падает с ростом скорости.

3) При гидродинамическом режиме смазывания наблюдается полное разделение трущихся поверхностей жидкой плёнкой, трение определяется вязкостью смазки. Для гидродинамического режима характерен минимальный коэффициент трения (от 0,001 до 0,01).

Расчёт объёма износа (интенсивности износа)

Общий объём износа (интенсивность износа) рассчитывается по модели Арчарда [7]:

$$V = \frac{k \cdot W \cdot S}{H}, \quad (2)$$

где k – постоянный коэффициент износа;

W – общая нормальная нагрузка, МПа;

S – путь трения поверхностей, м;

H – микротвердость поверхности, ГПа.

Для базового образца пары трения «сталь 40Х – сталь 40Х» значения коэффициента износа и микротвердости поверхности соответственно равны:

– при граничном трении $k \approx 1,2 \cdot 10^{-4}$ мм³/Н·м, $H \approx 5,5$ ГПа;

– при нанесении покрытия TiN/MoS₂ $k \approx 2,5 \cdot 10^{-6}$ мм³/Н·м, $H \approx 18\text{--}22$ ГПа.

Расчётный прогноз снижения износа:

$$\frac{V_{\text{баз}}}{V_{\text{пок}}} = \frac{k_{\text{баз}} \cdot H_{\text{пок}}}{k_{\text{пок}} \cdot H_{\text{баз}}}. \quad (3)$$

Подставляя числовые значения в формулу (3), получаем теоретически ожидаемое снижение интенсивности износа:

$$\frac{V_{\text{баз}}}{V_{\text{покр}}} = \frac{1,2 \cdot 10^{-4} \cdot 20}{2,5 \cdot 10^{-6} \cdot 5,5} \approx 38.$$

Термические напряжения в покрытии

При циклических перепадах температур в покрытии возникают термические напряжения. Формула термических напряжений приведена в соответствии с классической теорией термонапряжённого состояния [8, 9]:

$$\sigma_{\text{терм}} = \frac{E_c \cdot \Delta\alpha \cdot \Delta T}{1 - \nu_c}, \quad (4)$$

где E_c – модуль упругости, ГПа ($E_c = 450$ ГПа),

$\Delta\alpha$ – разность коэффициентов теплового расширения, K^{-1} ($\Delta\alpha = 4,5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$),

ΔT – перепад температуры, К ($\Delta T = 120$ К),

ν_c – коэффициент Пуассона ($\nu_c = 0,25$).

Подставляя числовые значения в формулу (4), получим:

$$\sigma_{\text{терм}} = \frac{450 \cdot 4,5 \cdot 10^{-6} \cdot 120}{1 - 0,25} \approx 0,324 \text{ ГПа}.$$

Полученное значение существенно ниже предела адгезионной прочности системы Ti-C-Mo-S/TiN/сталь 40X ($>1,2$ ГПа), что гарантирует сохранение целостности покрытия при более чем 500 термоциклах [8]. Расчётная зависимость интенсивности износа представлена на рисунке 5.

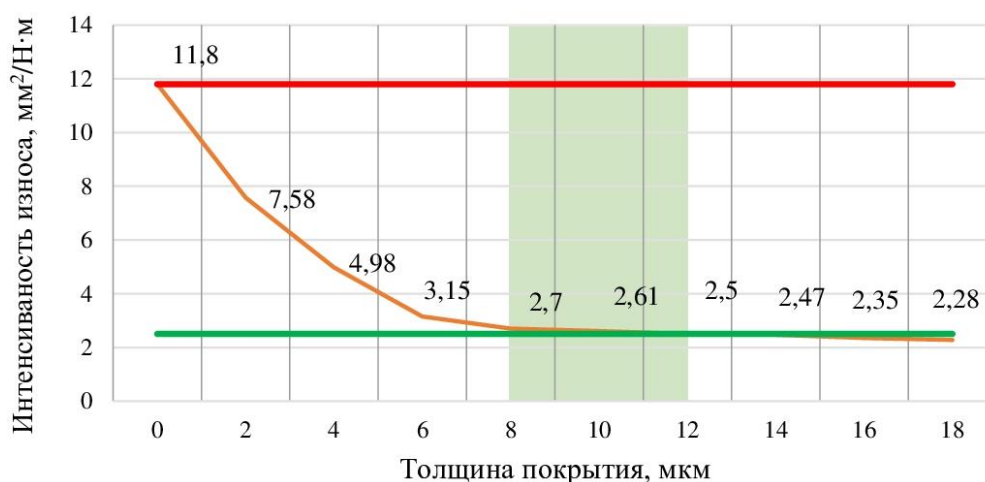


Рисунок 5 – Расчётная зависимость интенсивности износа пары «поршень-цилиндр» от толщины антифрикционного покрытия при постоянной нагрузке 25 МПа

Обоснование выбора и технология нанесения антифрикционного покрытия

Выбрано комбинированное многослойное покрытие, формируемое в вакуумной камере методом магнетронного распыления с ассистирующим воздействием плазмогенератора. Порядок нанесения многослойного покрытия разработан с учётом условий эксплуатации АПН в РТС 1956 и включает следующие слои:

1. Адгезионный подслои (Ti-C-Mo-S) толщиной от 0,8 до 1,2 мкм – промежуточный слой между материалом детали и финишным покрытием. Основная задача данного слоя – обеспечение прочного сцепления (адгезии) между деталью и покрытием, а также сглаживание различий в физико-химических свойствах материалов.

2. Упрочняющий слой нитрида титана (TiN) толщиной от 4,5 до 6,0 мкм. Это основной слой, обладающий микротвердостью 20–24 ГПа, характеризующийся высокой коррозионной стойкостью, антикавитационными свойствами. Защищает основу от абразивного износа и гидроударов.

3. Антифрикционный верхний слой на основе дисульфида молибдена, модифицированный добавлением титана (MoS_2 , легированный Ti) толщиной от 2,0 до 3,0 мкм. Обеспечивает коэффициент трения от 0,018 до 0,035 в масляной среде. Верхний антифрикционный слой работает по принципу твердосмазочного эффекта и способен компенсировать кратковременное «масляное голодание».

Комбинирование Ti и MoS_2 решает проблему деградации дисульфида молибдена в присутствии влаги: титан связывает кислород, формируя оксид титана, который упрочняет поверхностный слой и блокирует образование абразивного MoO_3 [9, 10].

Метод нанесения основан на магнетронном осаждении с ассистирующим воздействием плазмогенератора. Процесс осуществляется в вакуумной камере. В качестве мишеней используются катоды из титана и молибдена чистотой 99,95 %. Подложка (поршень) подвергается шлифовке и очистке в этаноле.

Нанесение покрытия осуществляется при следующих режимах:

- базовое давление в камере: $1,33 \cdot 10^{-4}$ Па;
- рабочее давление (Ar): 0,67 Па;
- материал мишеней: Ti и Mo (чистота 99,95 %);
- ток на мишени (TiN): 6 А (поддержание 0,3 А);
- мощность магнетронного разряда: ~1,0 кВт на катод;
- потенциал смещения: 1 200 В (легирование), 200 В (осаждение);
- температура подложки: ≤ 400 °С (сохраняет свойства термообработанной стали 40X);
- вращение подложки: планетарное, 5–8 об/мин для обеспечения равномерности на цилиндрических поверхностях поршней.

Результаты нанесения на детали покрытия разной толщины приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Свойства поверхностей деталей при толщине наносимого покрытия

№ п/п	Толщина покрытия, мкм	Твердость, ГПа	Коэффициент трения (масло, 60 °С)	Адгезия (царапание), Н	Влияние на зазор
1.	4,0	16,2	0,028	65	Незначительное
2.	8,5	20,1	0,021	88	В пределах допуска
3.	14,0	21,8	0,019	72	Требуется доводка
4.	22,0	22,5	0,018	58	Критичное

Для серийного внедрения в РТС 1956 рекомендовано наносить покрытие толщиной в диапазоне от 8 до 12 мкм.

Экспериментальные исследования

Исследования проводились на трибологическом стенде, моделирующем работу пары «поршень-цилиндр» АПН в течение 1 500 часов непрерывной работы с контролем параметров каждые 50 ч работы и включали:

- циклические температурные воздействия в диапазоне от минус 30 °С до плюс 100 °С с промежуточными точками контроля: –30 °С, 20 °С, 60 °С, 90 °С, 100 °С;
- работу под нагрузкой от 5 до 50 МПа;
- скорости скольжения от 0,5 до 3,0 м/с;
- используемые масла: VG 32, VG 46.

Контролировались: коэффициент трения, линейный износ, микротвердость, адгезия, температура поверхности, состав рабочих жидкостей. Результаты трибологических испытаний приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Сравнительные трибологические характеристики пары трения «поршень-цилиндр»

Параметр	Базовая пара	Пара с покрытием TiN/MoS ₂
Коэффициент трения (при $t = -20\text{ }^{\circ}\text{C}$)	0,112	0,031
Коэффициент трения (при $t = +80\text{ }^{\circ}\text{C}$)	0,138	0,022
Температура поверхности при $P = 35\text{ МПа}$	+115 $^{\circ}\text{C}$	+92 $^{\circ}\text{C}$
Интенсивность износа, мм ² /Н·м	$1,18 \cdot 10^{-5}$	$2,9 \cdot 10^{-7}$
Износ поршня за 1 000 ч, мкм	18,4	0,6

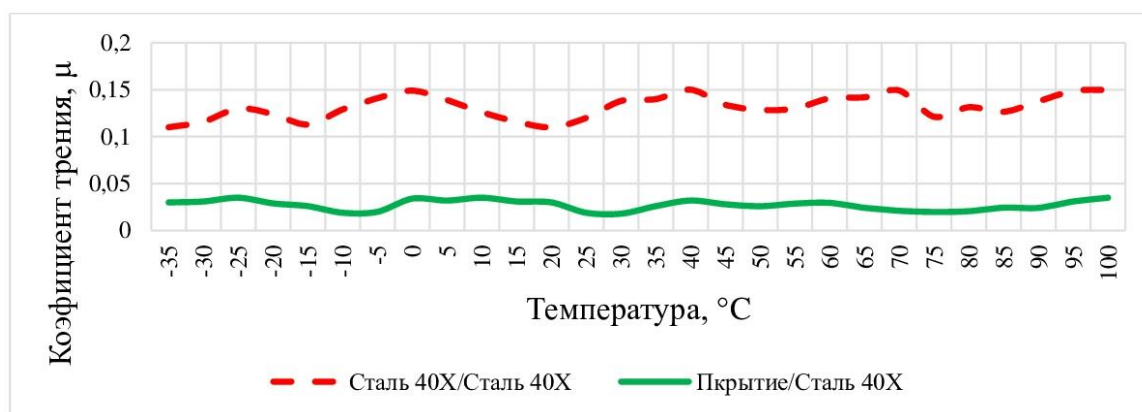


Рисунок 6 – Экспериментальные кривые коэффициента трения для базовой и модифицированной пар в диапазоне температур от минус 30 $^{\circ}\text{C}$ до плюс 100 $^{\circ}\text{C}$

График, изображенный на рисунке 6, наглядно демонстрирует стабильность коэффициента трения пары с нанесенным покрытием TiN/MoS₂ во всем температурном диапазоне, в то время как базовая пара показывает резкий рост μ при температурах ниже 0 $^{\circ}\text{C}$, и выше плюс 70 $^{\circ}\text{C}$.

Модифицированные АПН планируется установить на опытный образец РТС 1956 и провести полигонные испытания в условиях, имитирующих ликвидацию пожара на складском комплексе с последующим переходом в зону с отрицательной температурой.

Прогнозируемые результаты АПН после нанесения покрытия:

- сокращение времени выхода на рабочий режим гидросистемы от 30 до 40 %;
- сокращение вероятности заеданий и критического нагрева при 2 000 моточасов;
- стабилизация КПД насосного агрегата на уровне от 85 до 90 % (для сравнения, базовый КПД 74–78 %);
- увеличение наработки на отказ гидравлического контура с 350 до 1 200 часов.

Ориентировочные затраты на нанесение многослойного комбинированного покрытия составляют от 12 до 15 тыс. руб. за насос. Данные затраты окупятся за счёт снижения частоты капитальных ремонтов, сокращения простоев РТС 1956 и уменьшения расхода запасных частей в 4–5 раз.

С практической точки зрения нанесение комбинированного антифрикционного покрытия оказывает прямое влияние на тактико-технические характеристики робототехнического комплекса пожаротушения. Повышается готовность РТС 1956 к применению за счёт стабильной работы гидросистемы, которая позволяет комплексу оперативно выдвигаться в зону ЧС без предварительного прогрева или замены масла при любых температурах среды. Кроме

того, использование компонентов и комплектующих отечественного производства, включая доработанные насосы с нанесенным покрытием на пару «поршень-цилиндр», позволит снизить зависимость от импортных гидравлических систем и обеспечить независимость ремонтной базы. Методика нанесения многослойного покрытия Ti-C-Mo-S/TiN может быть применима не только к АПН, но и к другим узлам РТС 1956 (например, гидромоторы трансмиссии, опорно-распределительные диски, штоки цилиндров), что создаёт единую трибологическую платформу для всего комплекса.

Заключение

В работе проведено обоснование метода повышения износостойкости аксиально-поршневых насосов, применяемых в составе робототехнического средства пожаротушения РТС 1956. Установлено, что переменные температурные режимы, характерные для эксплуатации на местах ликвидации ЧС, приводят к деградации гидродинамической смазки пары «поршень-цилиндр» и ускоренному абразивно-усталостному износу.

Предложено комбинированное антифрикционное покрытие Ti-C-Mo-S/TiN, наносимое методом магнетронного распыления с плазмогенератором. Теоретические расчёты и стендовые испытания подтвердили предполагаемое улучшение характеристик пары трения «поршень-цилиндр», а именно:

- стабилизацию коэффициента трения в диапазоне от 0,018 до 0,035 при температурах от минус 30 °С до плюс 100 °С;
- снижение интенсивности износа в 35–40 раз;
- повышение ресурса насосного агрегата до 3 500 часов без критического износа;
- увеличение наработки на отказ гидросистемы РТС 1956 в 3,2 раза.

Внедрение насосов с нанесенным на пару трения «поршень-цилиндр» комбинированным покрытием в состав РТС 1956 повышает эксплуатационную надёжность робототехнического средства пожаротушения, сокращает время ликвидации пожаров, снижает риски для личного состава аварийно-спасательных формирований и вносит вклад в развитие отечественной робототехники в интересах национальной и техносферной безопасности.

Кроме того, возможно дальнейшее развитие направления по улучшению характеристик АПН за счёт нанесения покрытий. Перспективные направления развития включают интеграцию покрытий с системами автоматизированной диагностики оборудования на основе анализа вибрации и температуры гидравлики, а также разработку наноструктурированных композиционных слоев с самовосстанавливающимися свойствами для полностью автономных робототехнических групп.

Список литературы

1. Российская Федерация. Законы. О пожарной безопасности : Федеральный закон от 21.12.1994 № 69-ФЗ : принят Государственной Думой 18 ноября 1994 г. : редакция от 31.07.2025. – Текст : электронный // КонтурНорматив [сайт]. – URL: <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=504493> (дата обращения: 08.04.2026).
2. ГОСТ Р 54344-2011. Техника пожарная. Мобильные робототехнические комплексы для проведения аварийно-спасательных работ и пожаротушения. Классификация. Общие технические требования. Методы испытаний : издание официальное : утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 28 июня 2011 г. № 158-ст / разработан Федеральным государственным учреждением «Всероссийский ордена «Знак Почета» научно-исследовательским институтом противопожарной обороны МЧС России, Федеральным государственным учреждением «Всероссийский научно-исследовательский институт по проблемам гражданской обороны и чрезвычайных ситуаций» : введен впервые. – Москва : Стандартинформ, 2012. – 27 с.
3. ГОСТ 22.9.48-2025. Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Средства робототехнические аварийно-спасательные. Общие технические требования и методы испытаний : межгосударственный стандарт введен в действие в качестве национального стандарта Российской Федерации с 1 октября 2025 г. : внесен Межгосударственным техническим комитетом по стандартизации МТК 071 «Гражданская оборона, предупреждение и ликвидация чрезвычайных ситуаций» : дата введения 2025-10-01 / разработан Федеральным государственным бюджетным

- учреждением «Всероссийский научно-исследовательский институт по проблемам гражданской обороны и чрезвычайных ситуаций МЧС России» : введен впервые. – Текст : электронный. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1313236119> (дата обращения: 08.04.2026).
4. Гидравлика, гидромашины и гидроприводы / Т. М. Башта, С. С. Руднев, Б. Б. Некрасов [и др.]. – Текст : электронный. – 2-е изд., перераб. – Москва : Альянс, 2010. – 423 с. – URL: <https://obuchalka.org/20231201158546/gidravlika-gidromashini-i-gidroprivodi-bashta-t-m-rudnev-s-s-nekrasov-b-b-2010.html> (дата обращения: 09.04.2026).
 5. ASTM D341-03. Standard Practice for Viscosity-Temperature Charts for Liquid Petroleum Products / ASTM International. – Текст : электронный // GlobalSpec [сайт]. – URL: <https://standards.globalspec.com/std/270140/astm-d341>. – Дата публикации: 01.12.2003. Status: inactive
 6. Исследование влияния температуры на вязкостные характеристики смазочных материалов / А. С. Ровенских, Е. Г. Шубенкова, В. А. Игумина, А. Е. Карючина. – Текст : электронный // Молодой ученый. – 2019. – № 49(287). – С. 202–206. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41494535> (дата обращения: 09.04.2026).
 7. Шеповалов, И. М. Моделирование износа динамически нагруженной пары трения при вращательном движении исполнительного органа : магистерская диссертация / И. М. Шеповалов. – Текст : электронный. – ТПУ, 2021. – 158 с. – URL: https://www.academia.edu/87382338/Моделирование_износа_динамически_нагруженной_пары_трения_при_вращательном_движении_исполнительного_органа (дата обращения: 09.04.2026).
 8. Различия физико-трибологических свойств магнетронно-плазменного антифрикционного покрытия Ti-C-Mo-S, нанесенного на подложки из сталей 40X и 20X13 / А. Ю. Шубин, А. И. Потекаев, В. М. Савостиков [и др.] // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2017. – Т. 60, № 12. – С. 966–971.
 9. Бойли, Б. А. Теория термических напряжений / Б. А. Бойли, Дж. Х. Уинер ; пер. с англ. : Ж. С. Сислян, Б. Ф. Шорр ; под ред. Э. И. Григолюка. – Москва : Мир, 1964. – 517 с.
 10. Тарасенко, Ю. П. Использование наноструктурированного ионно-плазменного покрытия нитрида титана для повышения износостойкости плунжерных пар топливных насосов / Ю. П. Тарасенко, Л. А. Кривина, Я. А. Фель. – Текст : электронный // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2014. – № 3(31). – С. 142–148. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=22539970> (дата обращения: 10.04.2026).

References

1. Russian Federation. Laws. On Fire Safety : Federal Law of December 21, 1994, No. 69-FZ : adopted by the State Duma on November 18, 1994 : amended on July 31, 2025. KonturNormativ [website]. (In Russ.) URL: <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=504493>
2. GOST R 54344-2011. Firefighting Equipment. Mobile Robotic Systems for Emergency Rescue Operations and Firefighting. Classification. General Technical Requirements. Test Methods : Official publication : approved and put into effect by Order of the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology dated June 28, 2011, No. 158-st; developed by the Federal State Institution “All-Russian Order of the Badge of Honour Research Institute for Fire Defense of the Ministry of Emergency Situations of Russia” and the Federal State Institution “All-Russian Research Institute for Civil Defense and Emergencies” : introduced for the first time. Moscow : Standartinform, 2012. 27 p. (In Russ.)
3. GOST 22.9.48-2025. Safety in Emergency Situations. Robotic Emergency Rescue Equipment. General Technical Requirements and Test Methods : introduced as a national standard of the Russian Federation on October 1, 2025; introduced by the Interstate Technical Committee for Standardization ITC 071 “Civil Defense, Prevention and Elimination of Emergencies” : effective October 1, 2025; developed by the Federal State Budgetary Institution “All-Russian Research Institute for Civil Defense and Emergencies of the Ministry of Emergency Situations of Russia” : introduced for the first time. (In Russ.) URL: <https://docs.cntd.ru/document/1313236119>
4. Hydraulics, Hydraulic Machines, and Hydraulic Drives. T. M. Bashta, S. S. Rudnev, B. B. Nekrasov [et al.]. 2nd ed., revised. Moscow : Alliance, 2010. 423 p. (In Russ.) URL: <https://obuchalka.org/20231201158546/gidravlika-gidromashini-i-gidroprivodi-bashta-t-m-rudnev-s-s-nekrasov-b-b-2010.html>
5. ASTM D341-03. Standard Practice for Viscosity-Temperature Charts for Liquid Petroleum Products. ASTM International. GlobalSpec [website]. (In Eng.) URL: <https://standards.globalspec.com/std/270140/astm-d341>. Status: inactive
6. Study of the Effect of Temperature on the Viscosity Characteristics of Lubricants. A. S. Rovenskikh, E. G. Shubenkova, V. A. Iguminova, A. E. Karyuchina. Molodoi uchenyi. [Young Scientist]. 2019. № 49(287). Pp. 202–206. (In Russ.) URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41494535>
7. Shepovalov I. M. Modelling the Wear of the Dynamically Loaded Friction Pair During Rotational Motion of the Actuator : Master’s thesis. TPU, 2021. 158 p. (In Russ.) URL: https://www.academia.edu/87382338/Моделирование_износа_динамически_нагруженной_пары_трения_при_вращательном_движении_исполнительного_органа
8. Differences in the Physical and Tribological Properties of Magnetron-Plasma Antifricion Coating Ti-C-Mo-S Applied to Substrates of Grades 40X and 20X13 Steels. A. Yu. Shubin, A. I. Potekaev, V. M. Savostikov [et al.] Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Chernaya metallurgiya. [News of Higher Educational Institutions. Ferrous Metallurgy]. 2017. Vol. 60, № 12. Pp. 966–971. (In Russ.)
9. Boyle B. A. Theory of Thermal Stresses. B. A. Boyle, J. H. Wiener; translated from English by J. S. Sislyan, B. F. Schorr; edited by E. I. Grigolyuk. Moscow : Mir, 1964. 517. (In Russ.)

10. Tarasenko Yu. P. Use of Nanostructured Ion-plasma Titanium Nitride Coating to Improve the Wear Resistance of Fuel Pump Plunger Assemblies. Yu. P. Tarasenko, L. A. Krivina, Ya. A. Fel. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Povolzhskii region. Tekhnicheskie nauki.* [News of Higher Education Institutions. Volga Region. Engineering Sciences]. 2014. № 3(31). Pp. 142–148. (In Russ.) URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=22539970>

Статья поступила 17.04.2026

© А. В. Чучина, К. С. Коломийцев, 2026

*Рецензент: М. В. Коновальчик, канд. техн. наук,
Автомобильно-дорожный институт
(филиал) ДонНТУ в г. Горловка*

А. В. Чучина, К. С. Коломийцев

**Повышение эксплуатационной надёжности робототехнического средства пожаротушения
РТС 1956 за счёт нанесения антифрикционных покрытий на сопряжения
аксиально-поршневых насосов**

В статье рассматривается проблема снижения надёжности аксиально-поршневых насосов, применяемых в гидравлических системах отечественного робототехнического средства пожаротушения РТС 1956, при эксплуатации в условиях резких перепадов температур на местах ликвидации чрезвычайных ситуаций. Установлено, что экстремальные тепловые режимы приводят к критическому изменению вязкостных характеристик рабочей жидкости: загущению масла при холодном пуске и его разжижению при нагреве свыше 80 °С. Это вызывает деградацию гидродинамической смазки пары «поршень–цилиндр», переход в режим граничного трения, явление «масляного голодания» и ускоренный абразивно-усталостный износ сопрягаемых деталей. Для решения задачи предложено нанесение комбинированного антифрикционного покрытия Ti-C-Mo-S/TiN методом магнетронного распыления с плазмогенератором. Теоретические расчёты и стендовые испытания подтвердили высокую эффективность разработанного подхода. Покрытие обеспечивает формирование устойчивого твердосмазочного слоя с микротвёрдостью до 22 ГПа, стабилизирующего коэффициент трения в диапазоне 0,018–0,035 при температурах от –30 °С до +100 °С. Интенсивность линейного износа критических узлов снижается в 35–40 раз, а наработка насосного агрегата до появления задиров возрастает до 3 500 моточасов. Внедрение модифицированных аксиально-поршневых насосов в состав РТС 1956 повышает эксплуатационную готовность комплекса, сокращает время выхода на рабочий режим гидросистемы и минимизирует риски отказа техники в зоне чрезвычайной ситуации. Разработанное решение вносит вклад в обеспечение технологического суверенитета и бесперебойной работы отечественной робототехники в ходе реализации задач Министерства по чрезвычайным ситуациям.

РТС 1956, РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС ПОЖАРОТУШЕНИЯ, АКСИАЛЬНО-ПОРШНЕВОЙ НАСОС, ПЕРЕМЕННЫЕ ТЕМПЕРАТУРЫ, АНТИФРИКЦИОННОЕ ПОКРЫТИЕ, ТРИБОЛОГИЯ, ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ, ГИДРАВЛИЧЕСКАЯ СИСТЕМА, ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ СУВЕРЕНИТЕТ

A. V. Chuchina, K. S. Kolomiitsev

**Improvement of the Operational Reliability of the RTS 1956 Firefighting Robotic System
Through the Application of Anti-Friction Coatings**

The article addresses the problem of reduced reliability of axial-piston pumps used in the hydraulic systems of the domestically produced RTS 1956 firefighting robotic system during the operation under conditions of sharp temperature fluctuations at emergency response sites. It is determined that extreme thermal conditions lead to critical changes in the viscosity characteristics of the working fluid: oil thickening during cold starts and its thinning when heated above 80 °C. This causes degradation of the hydrodynamic lubrication in the “piston–cylinder” pair, a transition to boundary friction regime, the phenomenon of “oil starvation”, and accelerated abrasive-fatigue wear of the mating parts. To solve this problem, the application of a combined anti-friction coating Ti-C-Mo-S/TiN using magnetron sputtering with a plasma generator is proposed. Theoretical calculations and bench tests have confirmed the high effectiveness of the developed approach. The coating ensures the formation of a stable solid lubricant layer with a microhardness of up to 22 GPa, stabilizing the friction coefficient in the range of 0,018–0,035 at temperatures from –30 °C to +100 °C. 35–40 times, and the service life of the pump unit before the occurrence of scoring increases to 3,500 operating hours reduce the intensity of linear wear on critical components. The integration of modified axial-piston pumps into the RTS 1956 system enhances the operational readiness of the complex, reduces the time required for the hydraulic system to reach its operating mode, and minimizes the risks of equipment failure in the emergency zone. The developed solution contributes to ensuring technological sovereignty and the uninterrupted operation of domestic robotics in fulfilling the missions of the Ministry of Emergency Situations.

RTS 1956, FIREFIGHTING ROBOTIC SYSTEM, AXIAL-PISTON PUMP, VARIABLE TEMPERATURES, ANTI-FRICTION COATING, TRIBOLOGY, WEAR RESISTANCE, HYDRAULIC SYSTEM, TECHNOLOGICAL SOVEREIGNTY

Сведения об авторах:**Чучина Алевтина Витальевна**

Заведующий отделом Государственного бюджетного учреждения «Проектно-конструкторский технологический институт», г. Донецк, ДНР, Российская Федерация,

Телефон: +7 949 432-63-00

Эл. почта: a1@dongipro.ru

Коломийцев Константин Сергеевич

Конструктор 1 категории Государственного бюджетного учреждения «Проектно-конструкторский технологический институт», г. Донецк, ДНР, Российская Федерация,

Телефон: +7 949 371-80-85

Эл. почта: donpkti.donpkti@mail.ru

Authors' Information:**Chuchina Alevtina Vitalevna**

Head of Department of the State Budgetary Institution "Design and Technological Institute", Donetsk, DPR, Russian Federation,

Phone: +7 949 432-63-00

E-mail: a1@dongipro.ru

Kolomiitsev Konstantin Sergeevich

1st category Designer of the State Budgetary Institution "Design and Technological Institute", Donetsk, DPR, Russian Federation,

Phone: +7 949 371-80-85

E-mail: donpkti.donpkti@mail.ru