

УДК 621.224:621.438-192:620.178.16

РАЗРАБОТКА ИННОВАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРИНЦИПОВ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ РАБОЧИХ КОЛЁС ГИДРОМАШИН

Кодиров Икром Урал ўғли

<https://orcid.org/0009-0002-3810-6460>

q061rovikrom@gmail.com

Факультет: Энергетика

Кафедра: Гидроэнергетика и гидравлика

Бекмамат Хамдамов

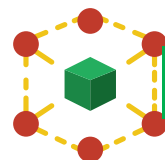
Доктор технических наук, исполняющий обязанности профессора, Ташкентский
государственный технический университет, Ташкент, 100095, Узбекистан;

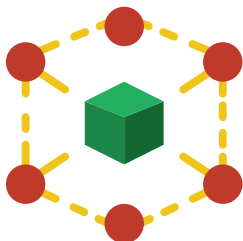
khamdamov_55@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0001-9434-6157>

АННОТАЦИЯ

Представлен аналитический обзор инновационных технологических принципов повышения износостойкости рабочих колёс гидромашин при совместном воздействии гидроабразивной, кавитационной и коррозионно-эрозионной нагрузок. Методология основана на вторичном анализе экспериментальных публикаций 2017–2026 гг., работ исследователей Узбекистана и требований ASTM G32. В сопоставимом кавитационном эксперименте относительная потеря массы составила 0,34 для лазерной наплавки, 0,88 для HVOF WC–CoCr, 0,91 для HVOF Cr-карбидного покрытия и 1,58 для HVOF WC–CoCr при принятии стали S135 за единицу. Показано, что высокая микротвёрдость сама по себе не гарантирует сопротивление кавитации; необходим комплексный учёт дефектности, адгезии, пластичности и угла атаки частиц. Предложены многоэтапная методология испытаний, критерии выбора покрытий и схема цифрового контроля поверхности. Статья не содержит собственных лабораторных испытаний: все экспериментальные величины атрибутированы исходным публикациям.





Ключевые слова: гидромашины, рабочее колесо, гидроабразивный износ, кавитация, лазерная наплавка, HVOF, HVAF, покрытия, долговечность.

ANNOTATSIYA

Maqolada gidromashinalarning ishchi g'ildiraklarini gidroabraziv, kavitatsion va korroziya-eroziya ta'siridan himoyalashning innovatsion texnologik tamoyillari tahlil qilinadi. Metodologiya 2017–2026-yillardagi ochiq eksperimental tadqiqotlar, O'zbekistondagi nasos ishchi g'ildiraklari bo'yicha nashrlar va ASTM G32 standartiga asoslangan ikkilamchi ma'lumotlar sintezidir. Bir xil kavitatsion protokolda lazerli qoplama bilan himoyalangan namuna massasi yo'qotilishi tayanch S135 po'latining 0,34 qismini, HVAF WC–CoCr 0,88 qismini, HVOF Cr-karbidli qoplama 0,91 qismini va HVOF WC–CoCr 1,58 qismini tashkil etgan. Natijalar maksimal qattqlikning o'zi kavitatsion barqarorlikni kafolatlamasligini, bog'lanish turi, g'ovaklik, yoriqqa chidamlilik va zarba burchagi muhimligini ko'rsatadi. E'lon qilingan ishlardagi statistik ko'rsatkichlar bir-biridan farqli sinov rejimlari bo'yicha umumiy reytingga birlashtirilmaydi.

Kalit so'zlar: gidromashina, ishchi g'ildirak, gidroabraziv yeyilish, kavitatsiya, lazerli qoplama, HVOF, HVAF, korroziya, kompozit qoplama.

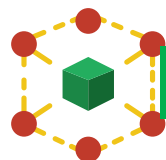
ABSTRACT

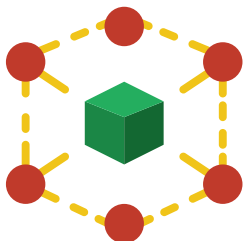
This article reviews innovative technological principles for improving the wear resistance of hydraulic-machine impellers and runners exposed to slurry erosion, cavitation and corrosion–erosion. It synthesizes published experimental studies from 2017–2026, relevant work from Uzbekistan, and ASTM G32 guidance. In a single comparable cavitation experiment, normalized mass losses were 0.34 for a laser-clad coating, 0.88 for HVAF WC–CoCr, 0.91 for an HVOF chromium-carbide-containing coating, and 1.58 for HVOF WC–CoCr, relative to S135 steel (1.00). The results indicate that hardness alone does not predict cavitation resistance; porosity, coating cohesion, toughness and particle impact conditions must be considered. A combined testing and digital-surface-monitoring framework is proposed. This study reports published results and engineering calculations, not new laboratory experiments.

Keywords: hydraulic machinery, impeller, turbine runner, slurry erosion, cavitation, laser cladding, HVOF, HVAF, surface engineering.

ВВЕДЕНИЕ

Рабочие колёса центробежных насосов и гидротурбин эксплуатируются в условиях многокомпонентного воздействия: твёрдые частицы в воде вызывают гидроабразивный





износ, локальное падение давления создаёт кавитацию, а химический состав воды определяет интенсивность коррозионной составляющей. Геометрические изменения лопаток меняют картину течения, напор и коэффициент полезного действия, повышая затраты на ремонты и остановки.

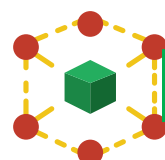
Для гидротехнических объектов с переменной мутностью воды, характерных в том числе для водохозяйственных и горнодобывающих систем Центральной Азии, универсального покрытия не существует. Материал, демонстрирующий высокую стойкость при нормальном ударе частиц, может работать хуже при скользящем ударе; покрытие с высокой микротвёрдостью может уступать пластичной наплавке в кавитационном испытании.

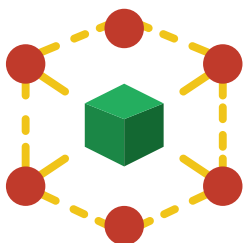
Современные методы поверхностной инженерии включают высокоскоростное газопламенное напыление HVOF, высокоскоростное воздушно-топливное напыление HVAF, лазерную наплавку, гибридные металлокерамические слои, локальное восстановление и постобработку поверхности. Их практическая эффективность зависит от пористости, прочности сцепления, химической устойчивости, термического влияния и сопротивления распространению трещин.

В опубликованном исследовании Wu и соавторов [1] исследованы четыре покрытия и сталь S135 по одному протоколу кавитационной эрозии. Относительная потеря массы колебалась от 0,34 до 1,58, а шероховатость — от 0,56 до 5,43 относительно исходной стали. Таким образом, разница между покрытиями связана не только с твёрдостью, но и с их микроструктурой и механизмами разрушения.

Для прикладной инженерии Узбекистана тема имеет двойное значение: защита рабочих колёс гидротурбин от наносов и повышение ресурса центробежных насосов, работающих с шахтными и загрязнёнными водами. В 2026 г. Хатамова и Юлдашева рассмотрели износ проточных поверхностей насосов под действием твёрдых частиц [7], а Каюмов, Пардаева и Истамов проанализировали функциональные покрытия для рабочих колёс центробежных насосов [8].

Цель исследования — сформулировать технологические принципы повышения износостойкости рабочих колёс гидромашин на основе сопоставления проверенных данных о покрытии, структуре материала, режимах изнашивания и методах диагностики, а также предложить последовательность лабораторно-производственной валидации.





Предлагаемый технологический цикл повышения ресурса рабочего колеса

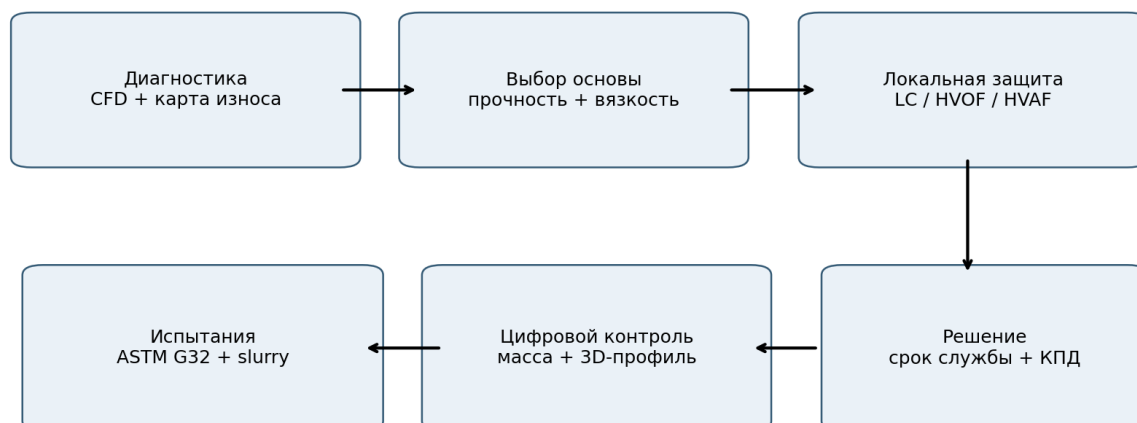


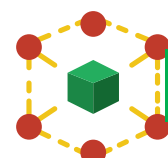
Рисунок 1. Предлагаемый цикл разработки и внедрения износостойкой защиты (авторская схема).

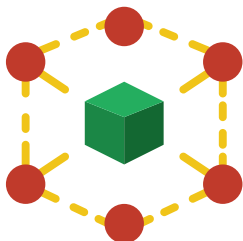
МАТЕРИАЛЫ, МЕТОДЫ И АНАЛИЗ ЛИТЕРАТУРЫ

Исследование выполнено как систематизированный инженерный обзор с воспроизведением отдельных количественных показателей из опубликованных работ. Исходные результаты испытаний не объединялись в единый метаанализ, поскольку авторы применяли различные составы сред, скорости потока, размеры абразива, углы воздействия и способы определения износа. Это ограничение принципиально: прямое сравнение коэффициентов из разных установок может вводить в заблуждение.

Первый блок включает кавитационную эрозию S135 и четырёх покрытий по единому эксперименту Wu и соавторов [1]: HVOF WC10Co4Cr, HVOF Cr₃C₂37WC18, HVOF WC10Co4Cr и лазерно-наплавленный никелевый слой. Значения потери массы, изменения шероховатости, пористости, прочности сцепления и микротвёрдости взяты из одной статьи, что обеспечивает внутригрупповую сопоставимость.

Второй блок охватывает лазерную наплавку мартенситных сталей [2]. В работе исследованы сопротивление кавитационной эрозии и гидроабразивному воздействию при углах 45° и 90°. Показатели 22,87; 1,32 и 1,91 раза относятся к разным видам изнашивания одной системы и не используются как универсальные коэффициенты продления срока эксплуатации гидромашины.





Третий блок связан с металлокерамическим покрытием $\text{CoNiCrAlY-Al}_2\text{O}_3$, нанесённым HVOF [3]. Эксперимент проводился при скоростях 6–12 м/с и углах воздействия 30–90°. Максимальное снижение скорости эрозии для состава с 12 мас.% Al_2O_3 составило 28,12% при 30°, 9,29% при 45° и 11,69% при 90°.

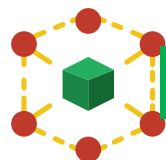
Четвёртый блок посвящён влиянию технологического маршрута. В публикации Kumaг и соавторов [4] при максимальной скорости струи интенсивность эрозии покрытия HVOF WC–CoCr оказалась в 2,26 раза ниже, чем для сопоставимого покрытия HVOF. Это независимое испытание в иных условиях, поэтому коэффициент нельзя механически переносить на данные кавитационного эксперимента [1].

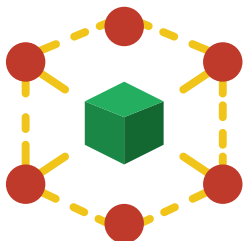
Нормируемый показатель кавитационного повреждения принят в виде $I = \Delta m \text{ покрытия} / \Delta m \text{ основы}$ при одинаковой длительности испытания. Для $I < 1$ покрытие даёт снижение массы потерь по сравнению с основой, а при $I > 1$ — увеличение. Инженерный показатель снижения потери массы вычисляется как $R = (1 - I) \times 100\%$, однако интерпретируется только в пределах одного протокола.

При практических испытаниях рекомендуется стандарт ASTM G32-16(2021)e1 [6] для сравнительной оценки кавитации, а для абразивной суспензии — отдельная установка с фиксированными гранулометрией, концентрацией, углом удара и скоростью. ASTM подчёркивает, что результаты кавитационных испытаний не всегда воспроизводят ранжирование в реальной гидромашине.

Блок оценки	Параметры	Критерий пригодности
Кавитация	Масса, время, профиль, ASTM G32	Низкая потеря массы и медленное повреждение
Гидроабразивный поток	Размер частиц, концентрация, скорость, угол	Сохранение стойкости при нескольких режимах
Структура покрытия	Пористость, адгезия, SEM/EDS, <u>микротвёрдость</u>	Отсутствие сквозных трещин и отслоения
Коррозионная составляющая	Вода и электрохимические измерения	Низкий риск селективной коррозии связи
Эксплуатационный контроль	3D-сканирование, вибрация, КПД	Стабильная геометрия и подтверждённый ресурс

Таблица 1.
Предлагаемая
система
комплексной
оценки
материалов и
технологических
процессов.





РЕЗУЛЬТАТЫ

Сопоставление единого кавитационного эксперимента [1] выявило неодинаковое поведение материалов. По сравнению со сталью S135, лазерная наплавка характеризовалась относительной потерей массы 0,34, что соответствует расчётному снижению на 66%. Для HVOF WC–CoCr снижение составило 12%, для HVOF Cr-карбидного покрытия — 9%. Напротив, HVOF WC–CoCr показало рост потери массы на 58%. Эти проценты рассчитаны из опубликованных отношений, а не измерены в новом эксперименте.

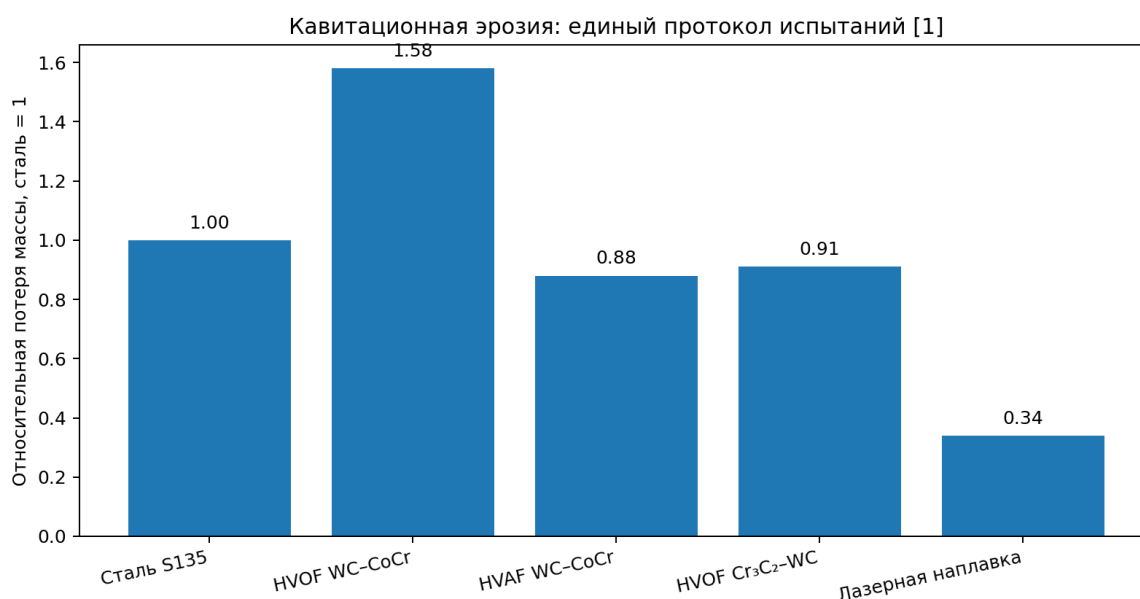
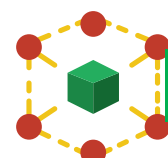
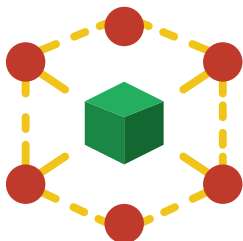


Рисунок 2. Относительная потеря массы в кавитационном эксперименте (данные [1]; основа = 1).

Материал	Относительная потеря массы	Расчёт к основе
S135	1,00	Базовый уровень
HVOF WC10Co4Cr	1,58	На 58% больше
HVOF WC10Co4Cr	0,88	На 12% меньше
HVOF Cr ₃ C ₂ 37WC18	0,91	На 9% меньше
Лазерная наплавка	0,34	На 66% меньше

Таблица 2. Пересчёт опубликованных данных по кавитационной потере массы [1].





Анализ шероховатости подтверждает, что для кавитационной среды необходимо учитывать развитие поверхности, а не только итоговую потерю массы. Относительная шероховатость покрытий HVOF WC-CoCr, HVAF WC-CoCr, HVOF Cr₃C₂-WC и лазерно-наплавленного слоёв составила соответственно 5,43; 3,48; 2,30 и 0,56 от показателя исходной стали [1].



Рисунок 3. Относительные показатели шероховатости по данным единого исследования [1]. Сопоставление с физико-механическими свойствами раскрывает фундаментальный механизм: наиболее твёрдое из исследованных покрытий не стало наиболее кавитационно-стойким. HVOF WC-CoCr имело микротвёрдость 1415 HV_{0.3} и пористость 0,45%, но потеря массы была выше базового материала. Лазерная наплавка при 338,77 HV_{0.3} дала минимальную потерю массы; её преимущество связывают с характером сцепления и ограничением распространения повреждений [1].

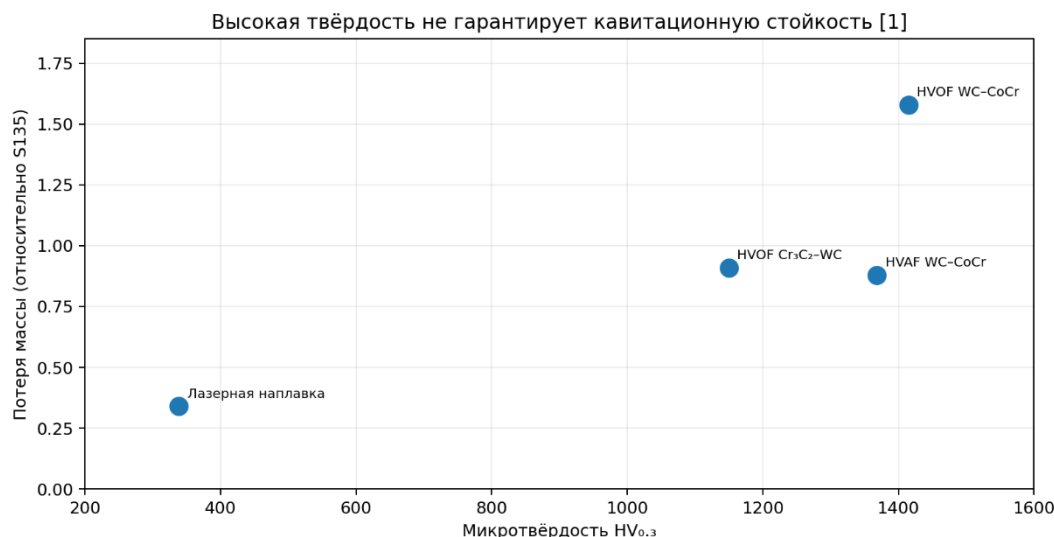
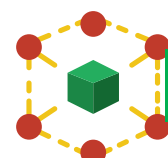
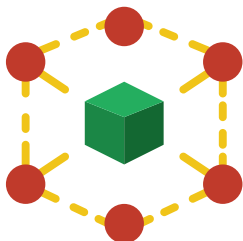


Рисунок 4. Различие твёрдости и кавитационной потери массы покрытий (данные [1]).





Покрытие	Пористость, %	Сцепление, МПа	HV _{0.3}
HVOF WC–CoCr	0,45	83,03	1415,14
HVAF WC–CoCr	0,32	81,25	1368,47
HVOF Cr ₃ C ₂ –WC	2,27	85,64	1150,10
Лазерная наплавка	Не указана	>100	338,77

Таблица 3. Опубликованные физико-механические показатели защитных слоёв [1].

В отдельном исследовании высокопроизводительной лазерной наплавки мартенситной стали [2] скорость построения слоя достигала 256 мм³/с против 154 мм³/с при низкомоощном процессе. Покрытие 0Cr12Ni9A обеспечило повышение стойкости относительно стали 0Cr13Ni5Mo в 22,87 раза при кавитационном испытании, в 1,32 раза при суспензионной эрозии под углом 45° и в 1,91 раза при угле 90°. Результаты подчёркивают режимную зависимость изнашивания и не позволяют подменять весь спектр воздействий одной цифрой.

Исследование HVOF металлокерамики [3] показало влияние геометрии столкновений. Для покрытия с 12 мас.% Al₂O₃ наибольшее снижение скорости эрозии достигалось при угле 30° (28,12%), тогда как при 45° и 90° составляло 9,29% и 11,69%. Это означает, что защитный эффект частично обусловлен экранирующей функцией керамической фазы при малых углах атаки.

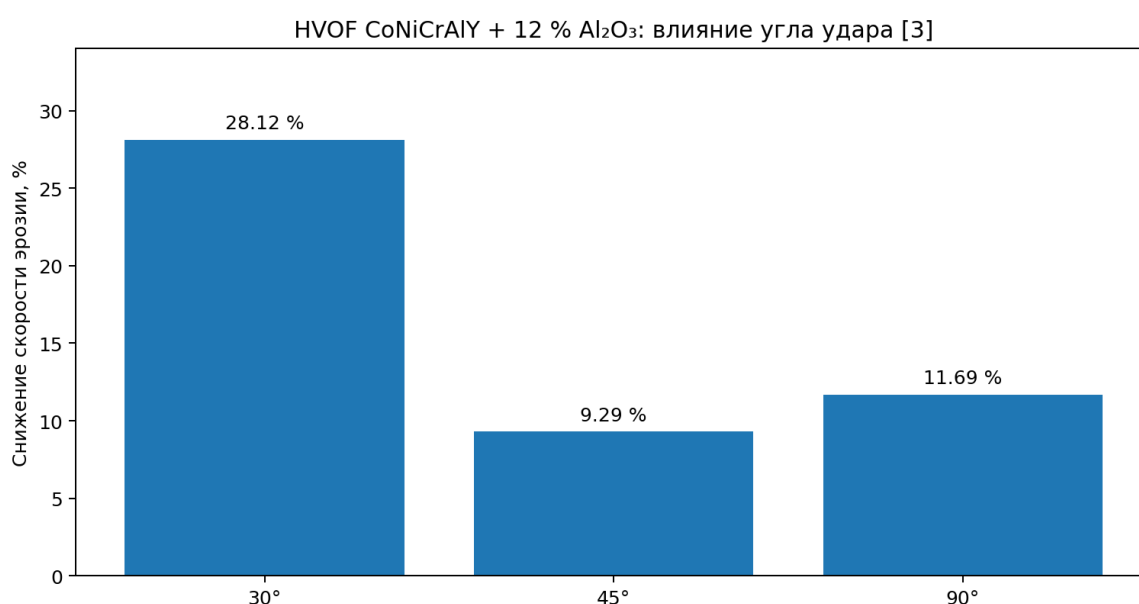
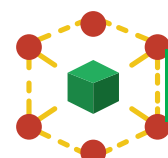
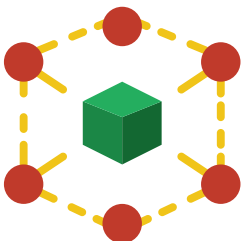


Рисунок 5. Влияние угла атаки на защитный эффект HVOF-композиата [3].





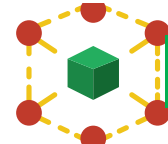
Источник	Технология и среда		Опубликованный результат	Ограничение переноса
[1]	LC / HVOF / HVOF; кавитация		LC: потеря массы 0,34 от S135	Не эквивалентно песчаному потоку
[2]	Лазерная наплавка; кавитация / суспензия		22,87×; 1,32× (45°); 1,91× (90°)	Разные физические механизмы
[3]	HVOF композит; 6–12 м/с		Снижение до 28,12% при 30°	Зависит от угла и состава
[4]	HVOF и HVOF; максимальная струя	HVOF: скорость эрозии в 2,26 раза ниже	Иные материал и протокол	

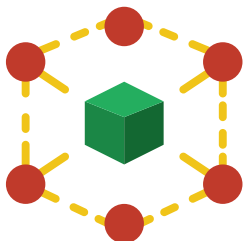
Таблица 4. Ключевые количественные результаты без межпротокольного ранжирования.

С точки зрения технологического проектирования предложены три взаимосвязанные стратегии. Первая — локальная защита высоконагруженных участков по результатам CFD-моделирования траекторий частиц и зон кавитации. Вторая — выбор покрытия не по максимуму микротвёрдости, а по сочетанию вязкости, низкой дефектности и стабильности в рабочей среде. Третья — интеграция испытаний образцов с цифровым контролем геометрии рабочего колеса в процессе эксплуатации.

Этап	Предлагаемое действие	Контрольный результат
1. Цифровая диагностика	CFD и карта эрозионно-опасных зон	Локализация защиты
2. Выбор покрытия	LC, HVOF либо HVOF по типу воздействия	Механически и химически совместимый слой
3. Лабораторная проверка	G32 + отдельная абразивная суспензия	Раздельные скорости кавитации и эрозии
4. Опытная эксплуатация	3D-профилометрия и контроль КПД	Фактическая деградация и интервалы ремонта
5. Цифровая обратная связь	Коррекция материала и режимов нанесения	Повторяемость и обоснованная экономика

Таблица 5. Авторские технологические принципы и показатели внедрения.





ОБСУЖДЕНИЕ

Основной вывод сравнительного анализа состоит в необходимости перехода от однокритериального подхода к многофакторному проектированию покрытий. Для чистой кавитации определяющими могут оказаться сопротивление усталостному зарождению трещин, характер межслойного сцепления и ограничение распространения повреждений, а не номинальная микротвёрдость. Для абразивного потока роль твёрдых включений возрастает, но результат существенно изменяется с углом воздействия.

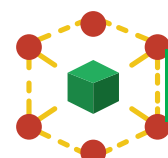
Покрытие HVOF WC–CoCr из исследования [1] сочетало высокую микротвёрдость с неудовлетворительным кавитационным результатом. В публикации отмечены поры и межламеллярные границы, на которых зарождались микротрещины; последующее выкрашивание ухудшало защитный эффект. В то же время HVOF-слой имел меньшую пористость, а лазерная наплавка продемонстрировала более благоприятный механизм сопротивления разрушению.

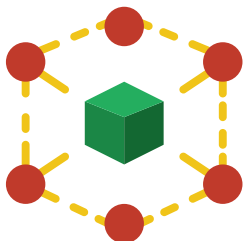
При этом нельзя делать противоположный универсальный вывод, что твёрдосплавное HVOF-напыление неэффективно. В другом экспериментальном диапазоне оно уменьшало гидроабразивный износ, а результаты зависят от состава порошка, скорости частиц, термической истории и предобработки поверхности. Поэтому выбор должен выполняться под реальный профиль эксплуатации конкретного колеса.

Исследование [2] представляет высокопроизводительную лазерную наплавку как путь восстановления сложных деталей. Повышение производительности формирования слоя с 154 до 256 мм³/с потенциально снижает время ремонта, однако требует контроля остаточных напряжений, зоны термического влияния, геометрических допусков и доступности лазерного оборудования.

Отдельная проблема — совместное действие коррозии и эрозии. У WC–CoCr износ связи может усиливаться химической агрессивностью воды. Измерение твёрдости и потери массы в пресной воде без электрохимического контроля недостаточно для выбора защиты насоса в шахтной воде. Для таких условий необходимо параллельное исследование коррозионного потенциала и морфологии локального разрушения.

Условия эксплуатации Узбекистана делают актуальными технологии контроля абразивной нагрузки на насосных станциях и ГЭС. Исследования местных авторов [7, 8] показывают прикладной интерес к шахтным водам, гидроабразивному износу проточных поверхностей и функциональным покрытиям. При этом статистические показатели из разных предприятий





нельзя объединять без нормировки по времени, концентрации наносов и типоразмеру оборудования.

Предлагается сочетать цифровую модель течения с наблюдаемой картиной износа. По результатам CFD определяются участки ускоренного движения абразива и локального падения давления. После ремонта проводится 3D-сканирование поверхности, а при плановых остановках — повторный контроль геометрии и шероховатости. Совпадение прогнозных и реальных повреждений служит критерием уточнения модели.

Статистическая часть будущего экспериментального исследования должна включать одинаковое время испытаний, независимые повторы, среднее и стандартное отклонение массовых потерь. Для сравнений покрытий целесообразны доверительные интервалы и анализ взаимодействий «покрытие × угол атаки × концентрация частиц». Приведённые в данном обзоре величины не являются результатом таких новых расчётов.

При выборе оптимального решения необходимо учитывать также технологичность ремонта в полевых условиях, стоимость порошков и расходных материалов, качество сцепления на криволинейных поверхностях, доступность неразрушающего контроля и влияние покрытия на гидравлическую геометрию. Только после опытной эксплуатации правомерно оценивать продление межремонтного ресурса и экономический эффект.

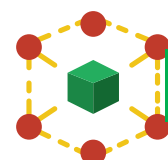
Предложенный инновационный принцип можно сформулировать как «диагностика зоны риска — градиентная локальная защита — многорежимная валидация — цифровой мониторинг». Он объединяет гидродинамическое проектирование, материаловедение, трибологию и управление жизненным циклом оборудования.

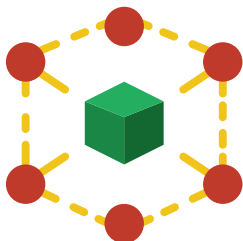
ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Комплексная износостойкость рабочих колёс гидромашин определяется одновременно механизмом нагружения, микроструктурой покрытия, пористостью, адгезией, прочностью и пластичностью материала, а также свойствами и концентрацией твёрдых частиц в потоке.

В едином кавитационном эксперименте лазерная наплавка показала относительную потерю массы 0,34 по сравнению с базовой сталью S135, тогда как наиболее твёрдое из рассмотренных покрытий HVOF WC–CoCr характеризовалось значением 1,58. Это подтверждает ограниченность выбора исключительно по твёрдости.

Для гидроабразивного потока эффективны материалы и покрытия, оптимизированные под скорость и угол удара. В отдельном исследовании HVOF металлокерамики снижение





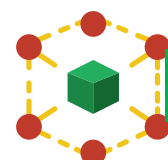
скорости эрозии зависело от угла и достигало 28,12% при 30°, но было существенно меньше при 45° и 90°.

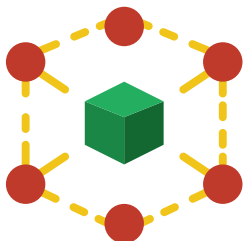
Инновационный технологический процесс должен объединять CFD-карту опасных зон, обоснованный локальный выбор технологии LC/HVOF/HVAF, отдельные кавитационные и гидроабразивные испытания, металлографический контроль и повторяемую цифровую диагностику поверхности.

Практическая проверка предложенных принципов для гидромашин Узбекистана требует собственных стендовых и производственных данных. Приведённые показатели представляют результаты опубликованных работ и инженерные расчёты, но не подтверждают нового экспериментального увеличения ресурса в конкретном агрегате.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ (APA)

1. Wu, P., Sun, S., Guo, P., Nan, H., Wang, T., & Zheng, X. (2026). Cavitation erosion characteristics and mechanisms of hydraulic turbine substrates and their coatings. *Ultrasonics Sonochemistry*, 125, 107732. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2025.107732>
2. Study on cavitation erosion and slurry erosion resistance of martensitic precipitation hardening stainless steel coatings fabricated by high power laser cladding. (2024). *Wear*, 558–559, 205562. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2024.205562>
3. HVOF-sprayed surface coating with various compositions of Co-NiCrAlY-Al₂O₃ to minimize sediment erosion in hydraulic turbines. (2024). *Surface and Coatings Technology*, 481, 130644. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2024.130644>
4. Kumar, R. K., Kamaraj, M., Seetharamu, S., & Anand Kumar, S. (2017). A pragmatic approach and quantitative assessment of silt erosion characteristics of HVOF and HVAF processed WC-CoCr coatings and 16Cr5Ni steel for hydro turbine applications. *Materials & Design*. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.06.046>
5. WC10Co4Cr coatings deposited by HVOF on martensitic stainless steel for use in hydraulic turbines: Resistance to corrosion and slurry erosion. (2019). *Surface and Coatings Technology*, 377, 124918. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2019.124918>
6. ASTM International. (2021). ASTM G32-16(2021)e1: Standard test method for cavitation erosion using vibratory apparatus. <https://doi.org/10.1520/G0032-16R21E01>
7. Хатамова, Д. Н., & Юлдашева, М. А. (2026). Исследование износа проточных поверхностей насоса под влиянием твёрдых частиц в составе шахтных вод. Цифровые технологии в промышленности. <https://doi.org/10.70769/3030-3214.SRT.4.1.2026.37>
8. Каюмов, У. Э., Пардаева, Ш. С., & Истамов, М. Ф. (2026). Повышение устойчивости к гидроабразивному изнашиванию рабочих колёс центробежных насосов на





основе упрочнения поверхностного слоя функциональными покрытиями. Цифровые технологии в промышленности. <https://doi.org/10.70769/3030-3214.SRT.4.1.2026.20>

9. ASTM International. (2021). ASTM G73-10(2021): Standard test method for liquid impingement erosion using rotating apparatus. <https://doi.org/10.1520/G0073-10R21>

10. Sediment erosion behavior of WC-Co-Cr coatings on 13-4 martensitic stainless steel for hydraulic turbine application. (2025). Journal of Tribology. <https://doi.org/10.1115/1.4068669>

