

**КОМПЛЕКСНЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ
ИЗНОСОСТОЙКОСТИ РАБОЧИХ КОЛЕС ГИДРОМАШИН В
УСЛОВИЯХ ГИДРОАБРАЗИВНОГО И КАВИТАЦИОННОГО
ВОЗДЕЙСТВИЯ**

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>

ANNOTATSIYA

Maqolada gidromashina ishchi g'ildiraklarining gidroabraziv va kavitatsion yeyilishga chidamliligini oshirishning kompleks usullari tahlil qilindi. O'zbekiston va xorijiy tadqiqotlar asosida himoya qoplamalarini tanlash, suvdagi qattiq zarrachalarni nazorat qilish va ish rejimlarini optimallashtirish tamoyillari yoritildi. Qoplamalarni qiyosiy baholash hamda tajribada tekshirish mezonlari taklif etildi. Ish adabiyotlar tahliliga asoslangan; yangi tajriba natijalari keltirilmagan.

Kalit so'zlar: gidromashina, ishchi g'ildirak, gidroabraziv yeyilish, kavitatsiya, himoya qoplamasi, yeyilishga chidamlilik.

АННОТАЦИЯ

Проанализированы комплексные способы повышения износостойкости рабочих колес гидромашин при гидроабразивном и кавитационном воздействии. По

материалам исследований, выполненных в Узбекистане и за рубежом, обосновано сочетание контроля состава наносов, выбора защитных покрытий и оптимизации режимов работы. Предложены критерии сравнения покрытий и этапы экспериментальной проверки. Работа имеет обзорно-прикладной характер; собственные испытания не заявляются.

Ключевые слова: гидромашина, рабочее колесо, гидроабразивный износ, кавитация, защитное покрытие, износостойкость.

ABSTRACT

This paper examines an integrated approach to improving hydraulic-machine impeller resistance to abrasive wear and cavitation. Research from Uzbekistan and abroad is used to combine sediment monitoring, protective coating selection, and operating-regime optimization. Comparable coating assessment criteria and validation steps are proposed. The paper is literature-based; no original experimental results are claimed.

Keywords: hydraulic machine, impeller, hydro-abrasive wear, cavitation, protective coating, wear resistance.

ВВЕДЕНИЕ

Надежность лопастных гидромашин во многом определяется состоянием поверхностей рабочих колес. При движении воды с минеральными примесями на кромках и в межлопастных каналах формируются локальные зоны абразивного воздействия. При неблагоприятных давлениях и нерасчетных режимах дополнительным механизмом разрушения становится кавитация. Совместное действие указанных факторов затрудняет прогнозирование ресурса, поскольку параметры потока, состав наносов и характеристики материала изменяются во времени (Felix et al., 2016; Krella, 2023).

Для условий Узбекистана проблема имеет прикладное значение. При исследовании воды и проточной части Бозсуйской ГЭС Кан и Ярбеков (2023) установили преобладание полевого шпата и кварца среди потенциально абразивных минералов и зафиксировали характерные повреждения деталей. Исследования, выполненные на центробежных насосах, также указывают на неравномерность изнашивания рабочих поверхностей в зависимости от движения потока и расположения лопастей (Уралов и др., 2022). Эти результаты нельзя механически переносить на любую гидромашину, однако они обосновывают необходимость учитывать конкретные гидрологические и эксплуатационные условия.

Цель работы — систематизировать технологические принципы комплексной защиты рабочих колес гидромашин от гидроабразивного и кавитационного износа и определить основные критерии проверки эффективности предложенных решений. Исследование выполнено методом сравнительного анализа опубликованных экспериментальных работ, отраслевых рекомендаций и действующих технических подходов.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Факторы и механизмы разрушения. Интенсивность гидроабразивного износа зависит не только от концентрации твердых частиц, но и от их размера, формы, минералогического состава, скорости и угла соударения с поверхностью. Возникающие в зоне обтекания вихри и локальные изменения давления изменяют траектории частиц и распределение нагрузки по лопастям. Кавитационные пузырьки при схлопывании вызывают кратковременные ударные воздействия и развитие поверхностной усталости. Поэтому повышение только твердости материала без учета вязкости разрушения и дефектности покрытия не гарантирует соответствующего увеличения ресурса (Krella, 2023).

По данным исследования Бозсуйской ГЭС содержание полевого шпата и кварца в проанализированных механических примесях суммарно составило 77,07%; авторы наблюдали мелкозернистый и бороздчатый типы повреждений (Кан & Ярбеков, 2023). Это значение относится именно к исследованным пробам и не характеризует автоматически все водотоки страны. Установленные особенности показывают, что при выборе защитного материала следует учитывать абразивную способность наносов, а не ограничиваться общей мутностью воды.

Технологическая защита. Международные исследования подтверждают перспективность высокоскоростного газопламенного напыления HVOF для получения металлокерамических защитных слоев. В сравнительных испытаниях Hong et al. (2021) покрытия WC–CoCr и Cr₃C₂–NiCr продемонстрировали различную устойчивость к кавитационному разрушению; характеристики зависели от структуры покрытия и скорости потока. Следовательно, выбор состава покрытия должен сопровождаться контролем пористости, адгезии и склонности к растрескиванию. Для отдельных типов насосных колес также рассматривается холодное газодинамическое напыление функциональных покрытий (Каюмов и др., 2026), однако его результативность для конкретных гидротурбин требует самостоятельного подтверждения.

Упрочняющее покрытие не устраняет причины неблагоприятной гидродинамики. Поэтому второй технологический блок включает устранение локальных зон отрыва потока, контроль допустимых зазоров, поддержание режимов в пределах рабочей характеристики и снижение поступления абразивных частиц с помощью доступных способов водоподготовки. Для гидротурбин IEC 62364:2019 предусматривает учет качества воды, материалов, конструкции и режимов эксплуатации при управлении гидроабразивным износом. При этом стандарт рассматривает гидроабразивную эрозию преимущественно отдельно от кавитации, что необходимо учитывать при проектировании программы комбинированных испытаний (International Electrotechnical Commission, 2019).

Таблица 1. Сочетание технологических решений по основным факторам износа

Условия и фактор риска	Предлагаемый технологический принцип
Высокая абразивность наносов	Анализ гранулометрического и минералогического состава; улавливание опасных фракций, если это технически допустимо.
Локальная эрозия лопастей	Картирование зон повреждений и локальное нанесение покрытия с контролем толщины, пористости и сцепления.
Кавитационные и переходные режимы	Коррекция эксплуатационного режима с учетом кавитационного запаса и ограничений производителя.

Примечание. Рекомендации составлены по результатам анализа литературы; технологические параметры определяются для каждой машины индивидуально.

Верификация предложенного подхода. Для исключения некорректного сравнения материалов предлагается проводить испытания контрольного образца и образца с покрытием при одинаковых концентрации и дисперсности наносов, скорости потока и продолжительности воздействия. Основными показателями должны стать удельная потеря массы на единицу площади и времени, глубина локальных повреждений, адгезионная прочность покрытия и изменение энергетических характеристик гидромашины. Относительную стойкость допустимо определять как отношение интенсивности износа базового материала к интенсивности износа покрытия только при сопоставимых режимах

испытаний; результат нельзя интерпретировать как гарантированное увеличение межремонтного периода без натурной проверки.

Реализация комплексного решения предполагает последовательность «диагностика рабочей среды — выбор локальных зон упрочнения — подготовка поверхности и нанесение покрытия — стендовая проверка — мониторинг в эксплуатации». При этом экономическая целесообразность определяется стоимостью подготовки и ремонта рабочих колес, влиянием покрытия на гидравлические потери и фактическим сокращением простоев, а не только показателем лабораторной твердости.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Повышение износостойкости рабочих колес гидромашин требует сочетания материаловедческих и гидравлических решений. Анализ исследований показывает практическую значимость мониторинга минеральных примесей для объектов Узбекистана, а также необходимость дифференцированного применения функциональных покрытий в наиболее нагруженных зонах.

Предлагаемый комплексный принцип включает оценку реального механизма износа, подбор покрытия по совокупности свойств, оптимизацию режимов потока и верификацию результатов в сопоставимых условиях. До проведения лабораторных и натурных испытаний количественные показатели роста ресурса для конкретной гидромашин следует рассматривать как неопределенные. Дальнейшее исследование целесообразно направить на испытания комбинированного кавитационно-абразивного воздействия и оценку экономической эффективности локального упрочнения.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ (APA)

1. Кан, Э. К., & Ярбеков, М. С. (2023). Анализ влияния механических примесей в воде на гидроабразивный износ турбин Бозсуйской ГЭС. *Universum: технические науки*, 10(115). <https://doi.org/10.32743/UniTech.2023.115.10.16120>
2. Каюмов, У. Э., Пардаева, Ш. С., & Истамов, М. Ф. (2026). Повышение устойчивости к гидроабразивному изнашиванию рабочих колес центробежных насосов на основе упрочнения поверхностного слоя функциональными покрытиями. *Цифровые технологии в промышленности*, 4(1). <https://doi.org/10.70769/3030-3214.SRT.4.1.2026.20>
3. Уралов, Б. Р., Муталов, Ш. А., Сирожов, Б. Ш., Вохидов, О. Ф., & Арзиева, Д. Б. (2022). Влияние гидроабразивного износа лопастей рабочего

колеса на напор центробежного насоса. Журнал Агро Процессинг, 4(7).
<https://tadqiqot.uz/index.php/agroprocessing/article/view/5875>

4. Mamajonov, M., Bazarov, D. R., Uralov, B. R., Djumabaeva, G. U., & Rahmatov, N. (2020). The impact of hydro-wear parts of pumps for operational efficiency of the pumping station. *Journal of Physics: Conference Series*, 1425, 012123. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1425/1/012123>

5. Felix, D., Albayrak, I., Abgottspon, A., & Boes, R. M. (2016). Hydro-abrasive erosion of hydraulic turbines caused by sediment—A century of research and development. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 49, 122001. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/49/12/122001>

6. Hong, S., Wu, Y., Wu, J., Zhang, Y., Zheng, Y., Li, J., & Lin, J. (2021). Microstructure and cavitation erosion behavior of HVOF sprayed ceramic-metal composite coatings for application in hydro-turbines. *Renewable Energy*, 164, 1089–1099. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.08.099>

7. International Electrotechnical Commission. (2019). Hydraulic machines—Guidelines for dealing with hydro-abrasive erosion in Kaplan, Francis and Pelton turbines (IEC 62364:2019). <https://webstore.iec.ch/en/publication/27320>

8. Krella, A. K. (2023). Degradation and protection of materials from cavitation erosion: A review. *Materials*, 16(5), 2058. <https://doi.org/10.3390/ma16052058>