

К ВОПРОСУ КОМПЛЕКСНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ПРИЧИН ПОТЕРИ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ НАСОСОВ ВОДООТЛИВНЫХ УСТАНОВОК

Мнацаканян В.У., Зотов В.В., Дятлова Е.В., Ренгач А.С., Морозов И.П.
Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», Москва

Ключевые слова: рабочие колеса, центробежный насос, горная промышленность, отказы, надежность, ресурс, повышение прочности, кавитация, коррозия, эрозия, усталостный износ.

Аннотация. Данная статья посвящена анализу основных видов износа, характерных для центробежных насосов, эксплуатируемых в горнодобывающей отрасли. Актуальность работы обусловлена необходимостью повышения ресурса и долговечности насосного оборудования, поскольку при разработке конструктивных мероприятий и выборе рациональных режимов работы требуется четкое понимание природы возникновения каждого вида износа и доступных методов, направленных на их снижение. Рассмотрены кавитационный, коррозионный, эрозионный и усталостный механизмы разрушения рабочих колёс как наиболее изнашиваемых элементов насоса. Особое внимание уделяется установлению взаимосвязи между условиями эксплуатации, механизмами изнашивания и мерами по их регулированию. В статье систематизированы меры, направленные на уменьшение рассмотренных видов износа, включая гидравлические (оптимизация режимов, модернизация конструкции), материаловедческие (защитные покрытия, подбор материалов) и эксплуатационные (контроль агрессивности среды, своевременный ремонт). Показано, что существующие математические модели учитывают преимущественно гидроабразивный износ деталей проточной части насоса без комплексного влияния кавитации, коррозии, состава перекачиваемой жидкости и других процессов. Обоснована необходимость разработки многопараметрической прогностической модели для определения ресурса насосов с учётом совокупности факторов (горно-геологических, конструкторско-технологических и эксплуатационных).

TOWARD A COMPREHENSIVE STUDY OF THE CAUSES OF LOSS OF EFFICIENCY OF CENTRIFUGAL PUMPS IN DEWATERING UNITS

Mnatsakanyan V.U., Zotov V.V., Dyatlova E.D., Rengach A.S., Morozov I.P.
National University of Science and Technology «MISIS», Moscow

Keywords: impellers, centrifugal pump, CNS, mining industry, failures, reliability, service life, strength enhancement, cavitation, corrosion, erosion, fatigue wear.

Abstract. This article presents an analysis of the main types of wear characteristic of centrifugal pumps used in the mining industry. The relevance of this work stems from the need to increase the service life and durability of pumping equipment, since the development of design measures and the selection of rational operating modes require a clear understanding of the nature of each type of wear and the available methods aimed at reducing it. The mechanisms of cavitation, corrosion, erosion, and fatigue failure of impellers as the most wear-prone components of the pump are examined. Particular attention is paid to establishing the interrelationship between operating conditions, wear mechanisms, and measures for controlling them. The article systematizes measures aimed at mitigating the considered types of wear, including hydraulic (optimization of operating conditions, design upgrades), material science (protective coatings, material selection), and operational (control of medium aggressiveness, timely repair) solutions. It is shown that existing mathematical models predominantly account for hydroabrasive wear of flow passage components without considering the combined effects of cavitation, corrosion, composition of the pumped liquid, and other processes. The necessity of developing a multiparameter predictive model for determining pump service life, taking into account a combination of factors (mining-geological, design-engineering, and operational), is substantiated.

Введение

Разработка месторождений полезных ископаемых напрямую связана с работой водоотливных систем, свыше 90% которых осуществляется центробежными насосами, составляющими более 70% от всего парка водоотливных установок страны [1].

Очевидно, что с годами интенсивность эксплуатации месторождений растёт, следовательно, расчет нагрузка на водоотливные установки. Таким образом, все актуальней

становятся вопросы эффективности работы данных агрегатов. Успешное решение этих вопросов во многом определяется обоснованным выбором конструктивных параметров, режимами эксплуатации, технологией упрочнения рабочих элементов в соответствии с условиями эксплуатации насосного оборудования. Одними из основных показателей долговечности центробежных насосов является ресурс.

Согласно ГОСТ 27.002-89, под ресурсом понимается наработка изделия с момента начала эксплуатации или после ремонта до наступления предельного состояния. Следует отметить, что, несмотря на широкий спектр различных износостойких материалов, используемых при производстве центробежных насосов, их эксплуатационный ресурс значительно отличается от регламентированного. Это связано с различными условиями, влияющими друг на друга, такими как:

- 1) горно-геологические условия;
- 2) наличие взвешенных агрессивных вод и наличие в них частиц горных пород, обладающих абразивными, эрозионными, коррозионными, кавитационными свойствами;
- 3) несоответствие требований инструкции по эксплуатации, а также периодичности ремонтов.

Описанием природы износа занимается такая наука как трибология, зародившаяся в конце 1930-х годах. Трибология трактует понятие износа как: «повреждение поверхности или удаление материала с одной или двух твердых поверхностей, находящихся в движении скольжения, качения или удара относительно друг друга» [2, 3].

Большинство общих определений износа сосредоточено на прогрессирующей потере или разрушении материала в результате механического взаимодействия между компонентами. Основываясь на различных механизмах износа, описанных в литературных источниках (1957-2002 гг.), в работе [4] приведены шесть основных процессов износа, каждый из которых представляет собой отдельное явление с одной общей чертой – потерей твердого материала с трущихся поверхностей. К этим типам износа относятся: адгезионный; абразивный; усталостный; ударно-эрозионный; химический или коррозионный; электродуговой износ.

Однако по оценкам исследователей механизмы адгезионного и абразивного износа составляют две трети всего износа, наблюдаемого в технике. За исключением усталостного износа, все остальные механизмы изнашивания происходят путем постепенного удаления материала.

Основная часть

Из рассмотренных выше видов износа для центробежных насосов характерны следующие: кавитационный; коррозионный; эрозионный; усталостный.

При этом наиболее изнашиваемой частью насоса являются рабочие колеса.

Кавитация в насосе связана с возникновением и последующим схлопыванием пузырьков воздуха в потоке перекачиваемой жидкости по причине разности давлений на различных участках лопастей рабочего колеса (рис. 1). Когда пузырьки воздуха сталкиваются с металлическими поверхностями, на поверхности образуется точечная коррозия. Кавитацию часто отличает постоянный треск на всасывающем участке насоса с последующим увеличением уровня вибрации и шума, снижением общего напора и производительности. Следует понимать, что кавитация может быть трудно различима в присутствии значительного фонового шума, если акустические сигналы не будут должным образом обработаны [5].

Чтобы выявить наиболее уязвимые зоны, подверженные кавитационному износу, необходимо рассмотреть характер движения жидкости в проточной части насоса. При входе во всасывающий патрубок поток, как правило, осевой, затем, проходя через входной участок спиральной камеры к рабочему колесу, он закручивается и ускоряется, что приводит к локальному падению давления у входных кромок лопаток [6].

Для уменьшения кавитационного износа выделяют основные группы мер, представленные в таблице 1.



а



б

Рис. 1. Эффект кавитации на кромке лопасти рабочего колеса насоса

Коррозия описывается как изменение физических, химических и механических характеристик материала, вызванное химическими и электрохимическими реакциями (рис. 2) в перекачиваемой жидкости. Коррозия приводит к деградации материала и потере его функциональности, что приводит к необратимому разрушению. Различают физическую, химическую и электрохимическую коррозию; в основе каждого лежит свой доминирующий механизм взаимодействия материала лимитирующей части насоса с перекачиваемой жидкостью (смесью) [7].



Рис. 2. Эффект коррозии рабочего колеса насоса

Ниже кратко рассматривается природа каждого типа коррозионного износа.

1. Физический (физико-коррозионный) износ.

Возникает при одновременном действии потока жидкости, механических нагрузок и коррозионной среды: металл сначала ослабляется коррозией, а затем продукты коррозии (для углеродистых и низколегированных сталей и чугунов: гидратированные оксидные соединения железа общего состава $Fe_2O_3 \cdot nH_2O$ с примесью солей типа $FeCO_3$ и $FeSO_4$; для нержавеющих и коррозионно-стойких сплавов: тонкая пассивная плёнка смешанных оксидов общего состава $Cr_2O_3-Fe_2O_3-NiO$ и $Cr_2O_3-Fe_2O_3-NiO$) и размягчённый поверхностный слой снимаются потоком и частицами. Данный эффект усиливается при высокой скорости потока (2-3 м/с), наличии взвешенных частиц в жидкости, кавитации и турбулентности.

2. Химический коррозионный износ.

Обусловлен прямой химической реакцией рабочей среды с материалом колеса без заметного токопроводящего контура: типично для горячей воды, агрессивных растворов, газонасыщенных жидкостей. В качестве основных причин, вызывающих данный вид коррозии можно выделить: высокий уровень растворенного кислорода или других окислителей, несоответствие марки сплава лимитирующих элементов с рабочими условиями, длительные простои насоса с рабочим колесом, погружённым в жидкость (ведет к неравномерному нарастанию продуктов коррозии на каналы) [8].

3. Электрохимический коррозионный износ.

Связан с протеканием электрохимических процессов: образованием гальванических пар между разнородными металлами (колесо – вал – крепёж), разностью потенциалов между зонами одного и того же колеса (в многоступенчатых насосах), а также блуждающими токами от внешних установок [9].

В качестве наиболее распространенных видов коррозии, встречающихся при эксплуатации насосов, выделяют [10]:

– *Равномерную коррозию* – при которой происходит равномерные потери металла на всей смачиваемой поверхности в отсутствие защитной пленки.

– *Точечную коррозию* – по природе происхождения данный вид коррозии можно отнести к химической. Она возникает, когда защитная пассивная пленка на восприимчивой металлической поверхности разрушается.

– *Щелевую коррозию* – возникает, когда один металлический элемент плотно прилегает, но не приваривается или не прикрепляется к другому металлическому или неметаллическому элементу, в результате чего образуется крошечная полость или щель.

– *Гальваническую коррозию* – по природе происхождения данный вид коррозии можно отнести к электрохимической. Возникает, когда два разнородных металла соединяются и попадают в общую агрессивную водную среду, в результате между металлами протекает индуцированный ток, в воде возникают ионные потоки, и происходит коррозия более активного металла.

– *Межкристаллитную коррозию* – возникает в результате конденсации материала вблизи границ зерен.

– *Графитовую коррозию* – по своей природе ее можно отнести к электрохимической коррозии серых чугунов, при котором металлическая матрица железа растворяется, а графит остаётся в виде пористой «губки» и непрочного скелета.

– *Коррозионное растрескивание под напряжением* – по своей природе его можно отнести к электрохимической коррозии. Данный вид коррозии обусловлен образованием и ростом трещин в металле при одновременном действии растягивающих напряжений и коррозионно-агрессивной среды. Оно опасно тем, что разрушение происходит при напряжениях, которые могут быть значительно ниже предела текучести материала, и часто без заметной общей потери сечения.

– *Эрозию (эрозионную) коррозию* – природа данного вида коррозии двунаправленная – химическая и механическая и в итоге коррозия ослабляет и депассивирует поверхность, а поток жидкости снимает продукты коррозии и оголяет металл, ускоряя дальнейшую коррозию.

– *Кавитационную коррозию* – по природе возникновения относится к механико-химическому процессу. Происходит разрушение металла в зоне кавитации, где на поверхность одновременно действуют микрогидроудары схлопывающихся пузырьков и агрессивная жидкая среда.

В таблице 1 приведены основные меры, направленные на снижение коррозионного износа лимитирующих частей насоса.

Эрозия – это вид износа, вызываемый струями и потоками твердых частиц, каплями жидкости и имплозией пузырьков, образующихся в жидкости. Эрозионное изнашивание вызывается ударами твердых или жидких частиц о твердую поверхность. Такие частицы перемещаются в текучей среде и обладают достаточной кинетической энергией, чтобы воздействовать на металлические поверхности (рис. 3).



Рис. 3. Эффект эрозии корпуса и рабочего колеса насоса

Насосы работают в самых разных условиях и обрабатывают широкий спектр агрессивных жидких и твердых сред. Скорость вращения насоса, геометрия рабочего колеса и корпуса, скорость потока и используемый материал – все эти факторы влияют на эрозию различных компонентов насоса [11].

В конструкциях центробежных насосов эрозионное изнашивание рабочего колеса имеет ярко выраженный локальный характер. Наибольшие повреждения, как правило, наблюдаются

в зоне входных кромок лопаток со стороны всасывания, где твёрдые частицы встречают металл при наибольшей относительной скорости и неблагоприятном угле столкновения. Существенный вклад вносит также износ напорной поверхности лопаток и выходной части проточного канала, где из-за закрутки и изменения направления потока возникают интенсивные вихревые структуры, концентрирующие потоки частиц на ограниченных участках поверхности. В совокупности это приводит к формированию характерных зон «выбивания» материала, определяющих ресурс рабочего колеса при перекачке абразивосодержащих сред [12].

Решения, направленные на снижение эрозионного износа в насосах представлены в таблице 1.

Усталостный износ – это повреждение и разрушение материала рабочего колеса при многократно повторяющихся (циклических) напряжениях, приводящих к локальному пластическому деформированию металла поверхности. Даже если сами по себе эти напряжения ниже предела текучести материала, при длительной эксплуатации циклические нагрузки приводят к накоплению микроповреждений, зарождению и росту усталостных трещин, в итоге – к хрупкому разрушению или отслоению фрагментов материала [13].

В свою очередь сам усталостный износ можно классифицировать:

– *Усталость при циклической нагрузке* – в качестве главного фактора являются переменные напряжения, при условно нейтральной среде. Это обычные многоцикловые и малоцикловые режимы, описываемые S-N и ε -N диаграммами.

– *Усталость под воздействием окружающей среды* – к данному типу относят коррозионную усталость, коррозионное растрескивание под напряжением, термоусталость и др.

– *Усталость материалов (усталостная прочность)* – данный тип определяется химическими свойствами самого материала рабочих органов, их структурой, термообработкой, а также дефекты и состояние поверхности рабочих органов (например, рабочего колеса) определяют пороговые напряжения, при которых начинается зарождение усталостных трещин.

Согласно анализу усталостного износа, авторами было определено, что усталостный износ можно уменьшить, воздействуя на три группы факторов, приведенные в таблице 1.

Табл. 1. Меры, направленные на повышение ресурса лимитирующих элементов центробежных насосов при различных механизмах изнашивания

Комплекс мер	Техническое решение	Вид износа			
		Кавитационный	Коррозионный	Эрозионный	Усталостный
<i>Гидравлические</i>	Повышение давления на входе в насос	✓	–	–	–
	Уменьшение требуемого кавитационного запаса (NPSH)	✓	–	–	–
	Модернизация конструкции (уменьшение вихрей, ударного обтекания)	–	–	✓	–
	Работа вблизи оптимальной точки (BER)	–	–	✓	✓
<i>Материаловедческие</i>	Защитные покрытия (полимерные, битумные)	–	✓	✓	–
	Выбор материала колёс под специфику жидкости	–	✓	✓	–
	Повышение усталостной стойкости материалов	–	–	–	✓
<i>Эксплуатационные</i>	Снижение агрессивности среды (Cl^- , H_2S , ингибиторы)	–	✓	–	✓
	Контроль техсостояния, ремонт, устранение трещин	–	–	✓	✓

Вышеприведенный анализ свидетельствует о том, что элементы проточной части центробежных насосов, эксплуатируемых в водоотливных установках горных предприятий,

подвержены воздействию целого комплекса факторов, вызывающих интенсивный износ. Между тем, большинство представленных в научной литературе математических моделей отражают зависимость ресурса лимитирующих узлов от одного фактора – гидроабразивного износа [14]. Причем основные параметры последнего, к примеру, интенсивность износа, как правило, определяются в условиях проведения стандартных стендовых испытаний без учета кавитации, коррозии и влияния других факторов. Возможно, именно по этой причине столь велико расхождение между значениями регламентированного и фактического эксплуатационного ресурса (в 2-2,5 раза меньше) и результатами расчетов с использованием имеющихся математических моделей [14].

Таким образом, на основе выполненного анализа, определена необходимость решения актуальной научно-практической задачи по разработке многопараметрической математической модели для описания процессов изнашивания рабочего колеса насоса под воздействием комплекса факторов с привлечением инструментов компьютерного моделирования. Это позволит прогнозировать ресурс ответственного агрегата при его эксплуатации в сложных горно-геологических условиях с учетом применяемых конструкционных материалов, методов упрочнения рабочих поверхностей и конструктивных параметров деталей, а также свойств перекачиваемых сред и режимов эксплуатации водоотливных установок.

Заключение

Анализ различных видов износа, возникающих при эксплуатации центробежных насосов в горнодобывающей отрасли, позволяет сделать вывод, что элементы насоса испытывают воздействие ряда негативных факторов, при этом наиболее уязвимыми являются детали проточной части, в особенности рабочие колеса, лимитирующие ресурс насоса.

Выявлено, что в научно-технической литературе практически отсутствуют комплексные математические (прогностические) модели, отражающие состояние быстроизнашиваемых деталей насосов с учетом совокупности влияющих факторов – эксплуатационных и конструкторско-технологических.

Таким образом, представляется целесообразным решение многопараметрической задачи прогнозирования ресурса насоса, что обеспечит возможность обоснованного принятия мер, направленных на модернизацию конструкторско-технологических параметров и регламентов технического обслуживания и ремонта (ТОиР) изделия.

Список литературы

1. Суан Хынг Нгуен, Новикова А.Д., Мнацаканян В.У. Повышение ресурса горного оборудования за счет применения защитных покрытий // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. – 2023 – №19 – С. 185-189. – doi.org/10.26160/2658-3305-2023-19-185-189.
2. Meng Y., Xu J., Ma L., Jin Z., Prakash B., Ma T., Wang W. A review of advances in tribology in 2020-2021 // Friction. 2022, vol. 10, pp. 1443-1595. doi.org/10.1007/s40544-022-0685-7.
3. Abdullayev H., Huseynzade E., Sable H. A comprehensive review of wear mechanisms and mitigation strategies for tribological systems // Tribology in Industry. – 2025. – Vol. 47, №2. – P. 294-312. – doi.org/10.24874/ti.1897.02.25.04.
4. Bharat Bhushan. Introduction to Tribology. – New York: John Wiley & Sons, 2002. – 752 p.
5. Torgashin A.S., Zhujkov D.A., Nazarov V.P., Begishev A.M., Vlasenko A.V. CFD methods for cavitation modeling in centrifugal and axial pumps of LRE // Siberian Journal of Science and Technology. 2020, vol. 21, no. 3, pp. 417-422. doi.org/10.31772/2587-6066-2020-21-3-417-422.
6. Дергачева Л.В. Износ рабочего колеса насоса: причины, последствия и пути решения // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2024. – №1. – С. 412-417. – doi.org/10.24412/2071-6168-2024-1-412-413.
7. Thanikachalam V. The corrosion and erosion of centrifugal pumps in a marine environment: causes, effects and mitigation // International Journal of Advances in Engineering Research. 2017, vol. 13, no. VI, pp. 34-52.
8. Мубаракшина Л.Ф., Микрюкова Е.Ю. Коррозия металлов: химический процесс с экологическими последствиями // Вестник науки. – 2024. – Т. 4, №12(81). – С. 1954-1961.
9. Петрова Л.Г., Тимофеева Г.Ю., Демин П.Е., Косачев А.В. Основы электрохимической коррозии металлов и сплавов: Учебное пособие / Под общ. ред. Г.Ю. Тимофеевой. – М.: МАДИ, 2016 – 148 с.
10. Shen Z., Li R., Han W., Quan H., Guo R. Erosion Wear on Impeller of Double-Suction Centrifugal Pump due to Sediment Flow // Journal of Applied Fluid Mechanics. 2020, vol. 13, no. 4, pp. 1131-1142. doi.org/10.36884/jafm.13.04.30907.

11. Duan A., Lin Z., Chen D., Li Y. A review on the hydraulic performance and erosion wear characteristic of the centrifugal slurry pump // Particuology. 2024, vol. 95, pp. 370-392. doi.org/10.1016/j.partic.2024.10.006.
12. Roy A., Palit P., Das S., Mukhyopadhyay G. Investigation of torsional fatigue failure of a centrifugal pump shaft // Engineering Failure Analysis. 2020, vol. 112, pp. 104511. doi.org/10.1115/IMECE2018-88586.
13. Ерасов В.С., Орешко Е.И. Испытания на усталость металлических материалов (обзор) Часть 2. Анализ уравнения Басквина-Мэнсона-Коффина. Методики испытаний и обработки результатов // Авиационные материалы и технологии. – 2021. – №1(62). – С. 80-94. – doi.org/10.18577/2713-0193-2021-0-1-80-94.
14. Долганов А.В., Тимухин С.А. Гидроабразивный износ насосов рудничного водоотлива. – М: Изд. дом "Академия Естествознания", 2016. – 180 с.

References

1. Suan Hung Nguyen, Novikova A.D., Mnatsakanyan V.U. Increasing the service life of mining equipment through the use of protective coatings // Transport, Mining and Construction Engineering: Science and Production. 2023, no. 19, pp. 185-189. doi.org/10.26160/2658-3305-2023-19-185-189.
2. Meng Y., Xu J., Ma L., Jin Z., Prakash B., Ma T., Wang W. A review of advances in tribology in 2020-2021 // Friction. 2022, vol. 10, pp. 1443-1595. doi.org/10.1007/s40544-022-0685-7.
3. Abdullayev H., Huseynzade E., Sable H. A comprehensive review of wear mechanisms and mitigation strategies for tribological systems // Tribology in Industry. – 2025. – Vol. 47, №2. – P. 294-312. – doi.org/10.24874/ti.1897.02.25.04.
4. Bharat Bhushan. Introduction to Tribology. – New York: John Wiley & Sons, 2002. – 752 p.
5. Torgashin A.S., Zhujkov D.A., Nazarov V.P., Begishev A.M., Vlasenko A.V. CFD methods for cavitation modeling in centrifugal and axial pumps of LRE // Siberian Journal of Science and Technology. 2020, vol. 21, no. 3, pp. 417-422. doi.org/10.31772/2587-6066-2020-21-3-417-422.
6. Dergacheva L.V. Wear of pump impeller: causes, consequences and solutions // News of Tula State University. Technical Sciences. 2024, no. 1, pp. 412-417. doi.org/10.24412/2071-6168-2024-1-412-413.
7. Thanikachalam V. The corrosion and erosion of centrifugal pumps in a marine environment: causes, effects and mitigation // International Journal of Advances in Engineering Research. 2017, vol. 13, no. VI, pp. 34-52.
8. Mubarakshina L.F., Mikryukova E.Yu. Corrosion of metals: a chemical process with environmental consequences // Bulletin of Science. 2024, vol. 4, no. 12(81), pp. 1954-1961.
9. Petrova L.G., Timofeeva G.Yu., Demin P.E., Kosachev A.V. Fundamentals of electrochemical corrosion of metals and alloys: Textbook / Under the general editorship of G.Yu. Timofeeva. – M.: MADI, 2016 – 148 p.
10. Shen Z., Li R., Han W., Quan H., Guo R. Erosion Wear on Impeller of Double-Suction Centrifugal Pump due to Sediment Flow // Journal of Applied Fluid Mechanics. 2020, vol. 13, no. 4, pp. 1131-1142. doi.org/10.36884/jafm.13.04.30907.
11. Duan A., Lin Z., Chen D., Li Y. A review on the hydraulic performance and erosion wear characteristic of the centrifugal slurry pump // Particuology. 2024, vol. 95, pp. 370-392. doi.org/10.1016/j.partic.2024.10.006.
12. Roy A., Palit P., Das S., Mukhyopadhyay G. Investigation of torsional fatigue failure of a centrifugal pump shaft // Engineering Failure Analysis. 2020, vol. 112, pp. 104511. doi.org/10.1115/IMECE2018-88586.
13. Erasov V.S., Oreshko E.I. Fatigue testing of metallic materials (review) Part 2. Analysis of the Basquin–Manson–Coffin equation. Test methods and data processing techniques // Aviation Materials and Technologies. 2021, no. 1(62), pp. 80-94. doi.org/10.18577/2713-0193-2021-0-1-80-94.
14. Dolganov A.V., Timukhin S.A. Hydro-abrasive wear of mine drainage pumps. – M: Publ. house "Academy of Natural Sciences", 2016. – 180 p.

Сведения об авторах:

Information about authors:

Мнацаканян Виктория Умедовна – доктор технических наук, профессор кафедры горного оборудования, транспорта и машиностроения	Mnatsakanyan Victoria Umedovna – doctor of technical sciences, professor of the Department of mining equipment, transportation and mechanical engineering
Зотов Василий Владимирович – кандидат технических наук, и.о. заведующего кафедрой горного оборудования, транспорта и машиностроения	Zotov Vasily Vladimirovich – candidate of technical sciences, acting head of the Department of mining equipment, transportation and mechanical engineering
Дятлова Екатерина Валерьевна – аспирант	Dyatlova Ekaterina Valeryevna – postgraduate student
Ренгач Александра Сергеевна – аспирант	Rengach Aleksandra Sergeevna – postgraduate student
Морозов Илья Павлович – аспирант	Morozov Ilya Pavlovich – postgraduate student
lopushnyack.c@yandex.ru	

Получена 05.04.2026