



ГОРНЫЕ МАШИНЫ, ТРАНСПОРТ И МАШИНОСТРОЕНИЕ

Научная статья

<https://doi.org/10.17073/2500-0632-2022-2-150-160>**Оценка влияния твердой фазы шахтных вод на эффективность секционных насосов при разработке месторождений кимберлитовых руд**

Н. П. Овчинников

Северо-Восточный федеральный университет им. М. К. Аммосова, г. Якутск, Российская Федерация ovchinnlar1986@mail.ru**Аннотация**

Несмотря на принятые нововведения в горно-обогатительных комбинатах АК «АЛРОСА» (ПАО) в рамках обновленной стратегии по экономическому развитию, практика свидетельствует, что за последние несколько лет существенно возросли затраты на эксплуатацию секционных насосов главного водоотлива подземного рудника «Удачный». Такому росту затрат мог способствовать заметный рост концентрации механических примесей в шахтных водах. Настоящая работа посвящена комплексной оценке влияния концентрации механических примесей в шахтных водах на эффективность секционных насосов главной водоотливной установки подземного рудника «Удачный» для технико-экономического обоснования проходки дополнительных наклонных осветляющих резервуаров. Поставленная цель достигается путем проведения визуальных, аналитических, статистических и других видов исследований по установлению степени влияния концентрации механических примесей в шахтных водах на ряд эксплуатационных показателей секционных насосов водоотливных хозяйств подземных кимберлитовых рудников. Комплексными исследованиями доказано, что концентрация механических примесей в шахтных водах является ключевым фактором, определяющим межремонтный ресурс и электропотребление насосного оборудования. Межремонтный ресурс секционных насосов главной водоотливной установки подземного рудника «Удачный» может быть рассчитан как линейная функция их подачи на момент вывода в капитальный ремонт, изменение которой с высокой степенью достоверности описывается эмпирическим выражением $Q = -7,5X_6 + 326,67$, где X_6 – усредненная концентрация механических примесей в шахтных водах. Расчетным путем установлено, что снижение концентрации механических примесей в шахтных водах с 17 до 4 г/л позволит уменьшить годовые затраты на эксплуатацию насосного оборудования главной водоотливной установки рудника «Удачный» на 100 млн рублей.

Ключевые слова

добыча алмазов, подземный рудник, АК «АЛРОСА» (ПАО), рудник «Удачный», водоотлив, секционные насосы, износ, щелевые уплотнения, механические примеси, эффективность эксплуатации

Для цитирования

Ovchinnikov N.P. Assessment of mine water solid phase impact on section pumps performance in the development of kimberlite ores. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2022;7(2):150–160. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2022-2-150-160>

MINING MACHINERY, TRANSPORT, AND MECHANICAL ENGINEERING

Research article

Assessment of mine water solid phase impact on section pumps performance in the development of kimberlite ores

N.P. Ovchinnikov

M.K. Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russian Federation ovchinnlar1986@mail.ru**Abstract**

Despite innovations in ALROSA's (PJSC) mining and processing complexes under the updated strategy for economic development, practice shows that in recent few years the operating costs of the section pumps at the Udachny underground mine's main drainage have increased significantly. Such an increase could be the result of a concentration of mechanical impurities in the mine water. This study is aimed at the integrated assessment of the impact of mechanical impurities concentration in mine water on the performance of the Udachny underground mine's main drainage section pumps. It is also aimed at studying the feasibility of sinking additional inclined clarifying working-reservoirs. The target goal was

achieved by means of visual, analytical, statistical, and other types of research in determining the impact of the concentration of mechanical impurities in mine water on the performance indicators of section pumps of the kimberlite mine's underground drainage facilities. The integrated studies showed that the concentration of mechanical impurities in mine water is the key factor in determining the overhaul life and electricity demand of pumping equipment. The Udachny underground mine's main drainage section pumps overhaul life can be calculated as a linear function of their delivery rates at the moment of taking-down for overhaul. This function is reliably described by empirical expression $Q = -7.5X_6 + 326.67$, where X_6 is the averaged mechanical impurities concentration in the mine water. Calculations showed that reducing the concentration of mechanical impurities in mine water from 17 to 4 g/l would decrease the annual operating costs of the Udachny underground mine's main drainage section pumps by 100 million rubles.

Keywords

diamond mining, underground mine, PJSC ALROSA, Udachny mine, mine drainage, section pumps, wear, groove seals, mechanical impurities, operating efficiency

For citation

Ovchinnikov N.P. Assessment of mine water solid phase impact on section pumps performance in the development of kimberlite ores. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2022;7(2):150–160. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2022-2-150-160>

Введение

В период пандемии многие отечественные горнопромышленные компании переживают не лучшие времена в плане сбыта реализуемой продукции. Эти обстоятельства затронули и алмазодобывающую компанию «АЛРОСА» (далее – Компания), основные производственные мощности которой сосредоточены в Западной Якутии на территории Мирнинского района. В связи с временным падением спроса на технические и ювелирные алмазы в Компании в рамках обновленной стратегии по экономическому развитию активно внедряются различного рода технологические и технические решения по снижению себестоимости добычи и обогащения алмазосодержащего сырья.

Принятые нововведения в горно-обогатительных комбинатах в большой степени положительно сказались на финансовом положении Компании, но в то же время затраты по некоторым переделам горных работ не только не снизились, но и продолжают расти. К таким частным случаям можно отнести главный водоотлив подземного рудника «Удачный».

Существенная доля финансовых затрат на эксплуатацию насосного оборудования рассматриваемой водоотливной установки, представленного центробежными секционными насосами, приходится на следующие статьи расходов: выполнение капитальных ремонтов и электропотребление. Как видно из рис. 1, за последние шесть лет затраты по перечисленным статьям расходов S выросли более чем в 2 раза. В связи с этим весьма актуальными являются исследования по установлению причин такого роста затрат.

Существенному увеличению затрат мог способствовать заметный рост концентрации механических примесей в шахтных водах рудника, контакт с которыми активизирует процесс гидроабразивного изнашивания деталей проточной части, в первую очередь щелевых уплотнений рабочих колес (далее – щелевые уплотнения), в результате чего преждевременно ухудшаются рабочие параметры насосного оборудования [1, 2].

Негативное воздействие абразивного потока жидкости на насосное оборудование отмечается в более ранних исследованиях [3–5].

Хочется отметить, что достаточно высокая концентрация механических примесей в откачиваемых шахтных водах вызвана интенсивным загрязнением водоотливных трасс, по которым шахтная вода перемещается с горизонтов в водосборные горные выработки.

Основными источниками загрязнения являются просыпанная в процессе работы конвейерного транспорта горная масса и сгущенная ило-шламовая пульпа, проливаемая в процессе ее откатки погрузочно-доставочными машинами при чистке водосборников и осветляющих резервуаров, а также ее транспортировании на дневную поверхность подъемными установками.

В то же время в публикациях [6, 7] указывается, что при подземной разработке месторождений твердых полезных ископаемых секционные насосы часто выходят из строя в связи с обширным кавитационным разрушением деталей проточной части.

В работах [8, 9] отмечается, что для секционных насосов в случае достижения предельного радиального зазора в щелевых уплотнениях характерен процесс активизации адгезионного изнашивания корпусных и роторных деталей.

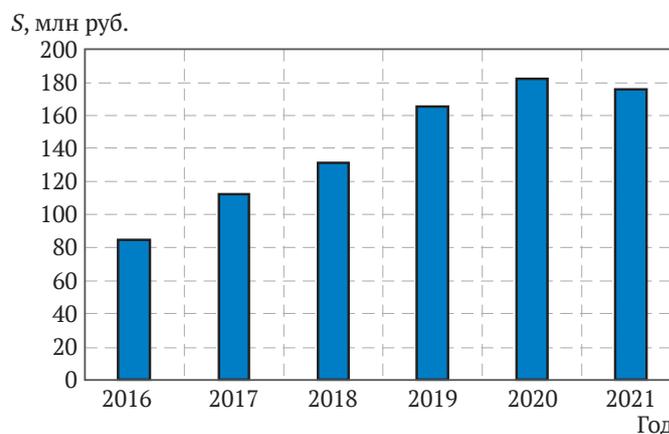


Рис. 1. Динамика изменения затрат на эксплуатацию насосного оборудования главной водоотливной установки подземного рудника «Удачный» по годам

Откачиваемые насосным оборудованием шахтные воды обладают в основном повышенной минерализацией и водородным показателем pH больше или меньше 7 [10].

В связи с этим при достаточной агрессивности шахтных вод к металлу для деталей проточной части секционных насосов может быть характерно развитие коррозии металла [11].

На основании анализа вышеприведенных работ констатируем, что снижение долговечности деталей проточной части секционных насосов подземных рудников и угольных шахт вызвано сложным многофакторным разрушением, представляющим собой комплексное воздействие на металл гидроабразивного, коррозионного, кавитационного и адгезионного видов изнашивания, где степень влияния каждого из представленных деградационных процессов зависит от гидрогеологических и горнотехнических условий конкретного разрабатываемого месторождения твердых полезных ископаемых.

Производственные службы предприятия ставят целью добиться значительного снижения содержания твердых частиц на выходе из водосборников главного водоотлива подземного рудника «Удачный» (с 17 до 4 г/л) и дальнейшего эффективного обезвреживания ило-шламовых отложений путем проходки дополнительных наклонных осветляющих резервуаров суммарным полезным объемом 7500 м³ (рис. 2). Однако сдерживающим фактором внедрения технических решений являются существенные капитальные затраты на их реализацию, приблизительно равные 340 млн рублей.

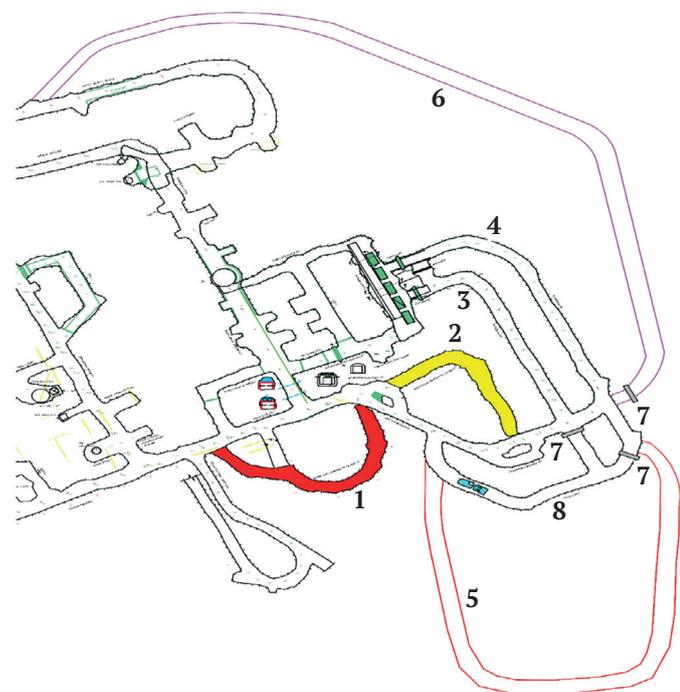


Рис. 2. Предлагаемая система главного водоотлива:

- 1 – осветляющий резервуар № 3; 2 – осветляющий резервуар № 4; 3 – водосборник № 1; 4 – водосборник № 2;
- 5 – проектный осветляющий резервуар № 5; 6 – проектный осветляющий резервуар № 6; 7 – перегородки;
- 8 – шламоотстойник

Целью настоящей работы является комплексная оценка влияния концентрации механических примесей в шахтных водах на эффективность секционных насосов главной водоотливной установки подземного рудника «Удачный» для технико-экономического обоснования проходки дополнительных наклонных осветляющих резервуаров.

Поставленная цель достигается путем проведения визуальных, аналитических, статистических и других методов исследований по установлению степени влияния концентрации механических примесей в шахтных водах на ряд эксплуатационных показателей секционных насосов подземных рудников Компании.

Объектом исследования являются секционные насосы водоотливных хозяйств подземных рудников Компании.

Методика исследований

Исследование износа щелевых уплотнений насосного оборудования главной водоотливной установки подземного рудника «Удачный», представленного секционными насосами моделей JSH-200 и НЦС(К) 350-1100

Результаты многочисленных обследований изношенных щелевых уплотнений свидетельствуют, что они подвержены преимущественно гидроабразивному износу, о чем свидетельствуют своеобразные волны на внешних поверхностях поясков рабочих колес и внутренних поверхностях уплотнительных колец, образованные при вихревом движении потока загрязненной механическими примесями шахтной воды (рис. 3: а–в). Наиболее крупные механические примеси под углом, близким к нормали, ударяются об металл, вызывая его деформацию в виде вмятин и наплывов. Меньше крупные механические частицы, двигаясь по касательной, срезают слой металла, в том числе образовавшиеся наплывы [12].

Установлено, что наибольшее разрушение металла при контакте с механическими примесями наблюдается в местах коррозии, которая развивается на поверхностях элементов щелевых уплотнений в виде локальных очагов (рис. 4). Дело все в том, что образовавшаяся на поверхностях деталей коррозионная пленка весьма чувствительна к истиранию механическими примесями [13].

В меньшей степени у отказавших щелевых уплотнений наблюдается адгезионное разрушение, которое проявляется в виде уменьшения толщины поясков рабочих колес и уплотнительных колец частично или по всей площади вследствие затирания деталей друг о друга (рис. 5: а, б). Рассматриваемый вид изнашивания является закономерным результатом критического осевого сдвига ротора у обследованных секционных насосов, обусловленного неравномерным распределением давления в боковых пазухах ступеней в связи с достижением предельного износа щелевых уплотнений в условиях гидроабразивно-коррозионной рабочей среды. Стоит отметить, что наличие такого вида механического изнашивания у деталей проточной части секционных насосов обычно свидетельствует об аварийном состоянии насосного оборудования.



а



б



в

Рис. 3. Гидроабразивный износ щелевых уплотнений рабочих колес:

а – пояски рабочих колес; б, в – уплотнительные кольца

Кавитационный износ щелевых уплотнений обследованного насосного оборудования практически не встречается, что объясняется его работой с подпором на всасывающей линии. Как известно, подпор обеспечивает давление на входе в насос выше атмосферного, тем самым затрудняя развитие кавитационных явлений.

По результатам выполненных визуальных осмотров отказавших щелевых уплотнений установлено, что преобладающим видом износа их поверхностей является гидроабразивный износ, который более интенсивно проявляется в местах образования коррозионной пленки.

Исследование износа секционных насосов подземных алмазодобывающих рудников

Периодичность капитальных ремонтов секционных насосов, зависящая от интенсивности гидроабразивно-коррозионного изнашивания поверхностей щелевых уплотнений за заданный промежуток времени, обусловлена влиянием следующих факторов внутренней и внешней среды:

- Факторы, отвечающие за скорость движения абразивного потока – номинальные подача X_1 и напор секционного насоса X_2 , номинальное число оборотов электродвигателя X_3 , номинальный диаметр пояска рабочего колеса X_4 , номинальный радиальный зазор в щелевых уплотнениях X_5 ;



Рис. 4. Коррозионная пленка на поверхности изношенного пояска рабочего колеса



Рис. 5. Адгезионный износ поясков и дисков рабочих колес



• Факторы, отвечающие за физико-механические характеристики твердой фазы шахтных вод – усредненная концентрация механических примесей X_6 , условный диаметр абразивной частицы X_7 , ее твердость X_8 и плотность X_9 ;

• Факторы, отвечающие за сопротивление истиранию поверхностей деталей механическими примесями – номинальная твердость металла X_{10} , усредненная минерализация X_{11} и усредненный водородный показатель шахтных вод X_{12} .

Далее автором был выполнен отбор наиболее значимых факторов, исходя из анализа теоретических основ перекачивания жидкостей, гидрогеологических условий разработки подземным способом кимберлитовых руд и отказов обследованных секционных насосов.

Из первой группы факторов для дальнейшего изучения картины гидроабразивно-коррозионного изнашивания были отобраны факторы X_1 и X_2 . Выбор в пользу фактора X_1 объясняется тем, что он является наиболее известным параметром, характеризующим кинематику движения воды в проточной части насосного оборудования. Кроме этого, в соответствии с теорией гидротранспорта рассматриваемый фактор может быть рассмотрен в виде функции конструктивных параметров насосного оборудования, влияющих на скорость перекачиваемого потока, т.е. факторов $X_3...X_5$. Именно поэтому в дальнейших исследованиях не были учтены вышеприведенные три фактора. Исключение фактора X_3 также объясняется тем, что его значение у преобладающей доли секционных насосов подземных рудников Компании одинаково и составляет по паспортной характеристике 1450 об/мин.

Отбор фактора X_2 аргументируется результатами визуальных осмотров щелевых уплотнений обследованного насосного оборудования. В ходе визуальных осмотров секционных насосов было установлено, что в большинстве случаев гидроабразивный износ щелевых уплотнений ступеней практически не различается, при том что наибольшее негативное воздействие механические примеси в теории должны наносить деталям начальных ступеней из-за своей остроугольной формы, которая становится более окатанной по мере перемещения от первой ступени к последней. В то же время окатанные твердые частицы в конечных ступенях перемещаются при большем давлении жидкости по сравнению с остроугольными твердыми частицами в начальных ступенях. То есть воздействие на металл окатанной частицы в зонах большего давления ставится в противовес ее изначальной остроугольной форме.

Из второй группы факторов был отобран только фактор X_6 . Применительно к остальным физико-механическим характеристикам твердой фазы шахтных вод, откачиваемых из подземных кимберлитовых рудников (остальные факторы группы), их значения практически одинаковы между собой, что объясняет отсутствие этих факторов в дальнейших исследованиях.

Детали проточной части секционных насосов, работающих в системах водоотлива подземных рудников Компании, выполнены преимущественно в кор-

розионностойком исполнении, что свидетельствует об идентичных эксплуатационных характеристиках, в том числе и прочностных свойств используемых при их отливке сталей. По этой причине был исключен фактор X_{10} . Практика показывает, что откачиваемые из подземных алмазодобывающих рудников шахтные воды в плане своей химической активности к металлу являются слабощелочными или слабокислыми растворами в зависимости от конкретного рудника. На основании вышеизложенного материала из третьей группы факторов были отобраны факторы X_{11} и X_{12} .

Исходя из полученных результатов аналитических исследований констатируем, что средний ресурс секционных насосов между капитальными ремонтами T может быть представлен в функции отобранных следующих пяти факторов:

$$T = f(X_1, X_2, X_6, X_{11}, X_{12}). \quad (1)$$

Степень влияния каждого из отобранных факторов определяется по результатам статистических исследований.

Статистические исследования влияния отобранных факторов на периодичность капитальных ремонтов секционных насосов

Статистические исследования по установлению степени влияния отобранных факторов на показатель T выполнялись следующим образом. Средневзвешенные значения параметров (см. формулу (1)) заносились в программную среду *MS Excel*, в которой в последующем формировались зависимости корреляционных полей. Далее с помощью аппроксимации линейным трендом определялись уравнения линейной регрессии и их параметры достоверности (рис. 6: а–д). Затем выполнялась проверка уравнений на адекватность на основе F -критерия Фишера с уровнем надежности $g = 0,05$ в пакете «Анализ данных».

Исходя из коэффициентов достоверности полученных регрессионных уравнений значение показателя T преимущественно обусловлено воздействием факторов X_2 и X_6 . Указанные результаты корреляционно-регрессионного анализа являются адекватными, так как значения параметра F -значимость в обоих случаях составили 0,03. Таким образом, выполненными исследованиями подтверждено отрицательное влияние твердой фазы шахтных вод на периодичность капитальных ремонтов секционных насосов подземных рудников Компании.

Несмотря на не слишком высокие значения коэффициентов достоверности уравнений регрессий, где аргументами функций являются факторы X_{11} и X_{12} , видно, что оба этих фактора тоже оказывают определенное влияние на межремонтный ресурс насосного оборудования подземных рудников Компании.

В то же время является интересным тот установленный факт, что средний ресурс секционных насосов до очередного капитального ремонта T_p , применяемых в системе главного водоотлива подземного рудника «Удачный», при более чем двукратном повышении фактора X_6 (с 7 до 17 г/л) снизился до 1625 ч (рис. 7, а), хотя согласно расчетам по полученной по

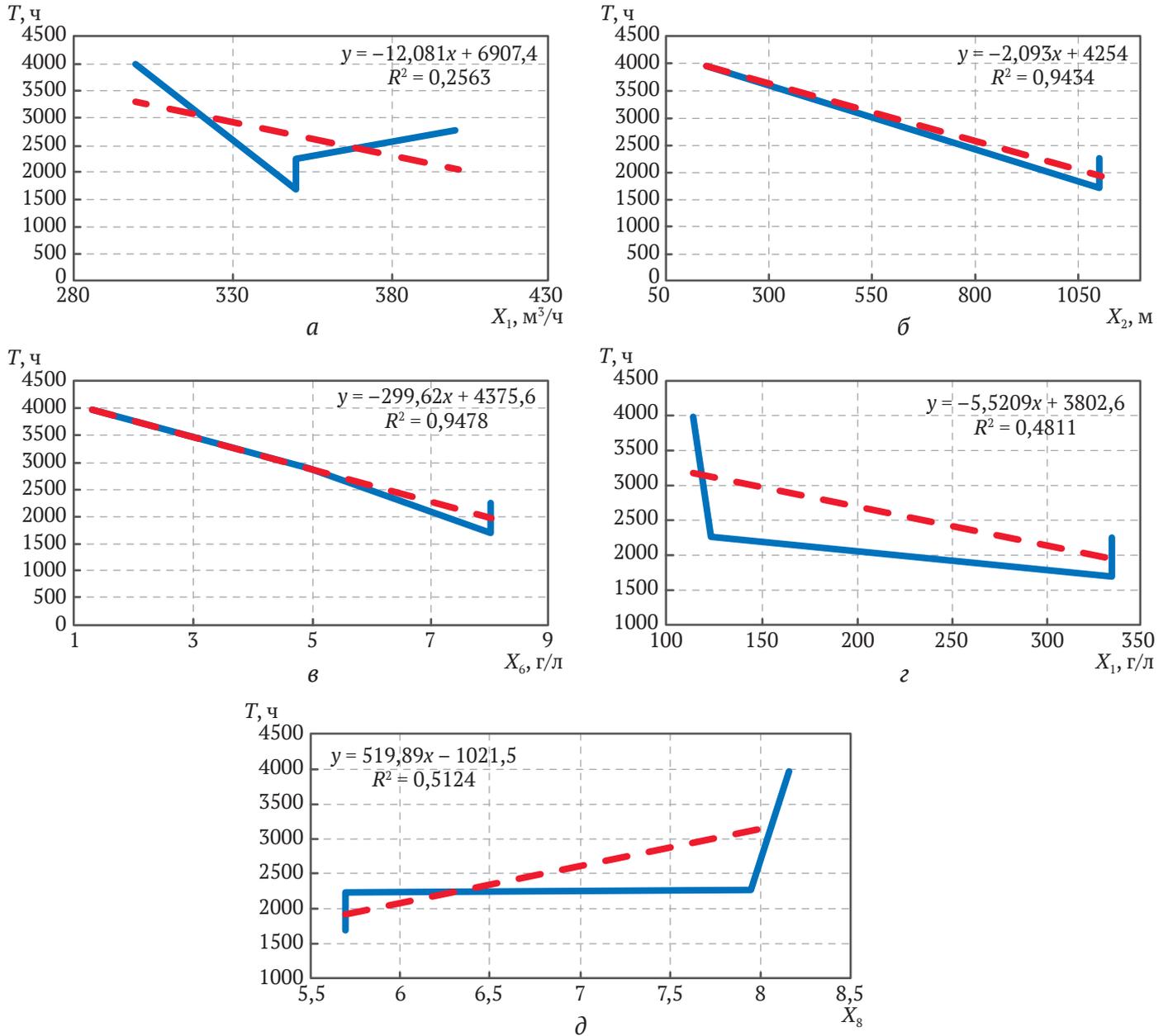


Рис. 6. Зависимости среднего ресурса секционных насосов между капитальными ремонтами от номинальной подачи (а), номинального напора (б), усредненной концентрации механических примесей (в), усредненной минерализации (z) и усредненного водородного показателя шахтных вод (д)

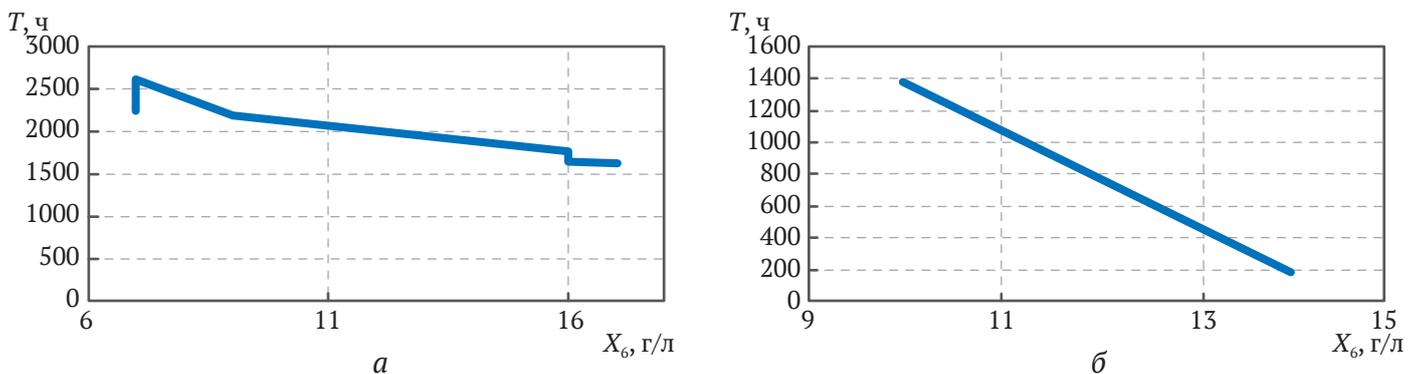


Рис. 7. Сравнение фактических (а) и расчетных (б) значений межремонтного ресурса в зависимости от концентрации механических примесей в шахтных водах



результатам статистических исследований формуле (см. рис. 6, в) прогнозное значение межремонтного ресурса при значении фактора $X_6 = 14$ г/л уже составляло менее 200 ч наработки (рис. 7, б).

В связи с такой нестыковкой результатов исследований автором были проведены дополнительные исследования.

Причины различия фактических и расчетных значений среднего ресурса насосного оборудования до капитального ремонта в зависимости от концентрации механических примесей в шахтных водах

Одним из критериев вывода секционного насоса в капитальный ремонт является значительное снижение его подачи (от 30 % и более от номинального значения) в результате увеличения размеров кольцевой щели.

В соответствии с результатами расчетов (рис. 8), выполненных по методике [14], радиальный зазор в щелевых уплотнениях h секционного насоса увеличивается более чем на 1 мм, т.е. достигает нижней гра-

ницы предельных значений (начальный радиальный зазор в щелевых уплотнениях секционных насосов подземного рудника «Удачный» составляет приблизительно 0,65 мм): при наработке t в 2250 ч, при этом $X_6 = 7$ г/л; при наработке t в 1750 ч, при этом $X_6 = 9$ г/л; при наработке t в 1000 ч, при этом $X_6 = 16...17$ г/л.

Установлено, что разница между практическими данными и результатами расчетов в плане межремонтного ресурса насосного оборудования особенно сильно проявляется при $X_6 = 16...17$ г/л.

При выполнении тщательного анализа опыта эксплуатации насосного оборудования главной водоотливной установки подземного рудника «Удачный» было установлено, что фактическое значение показателя T_p недостаточно сильно уменьшилось при $X_6 = 16...17$ г/л по причине его вывода в капитальный ремонт при достижении им более низкой подачи Q в сравнении с предыдущими годами (рис. 9, а). Как видно из рис. 9, б, параметры Q и T_p сильно взаимосвязаны друг с другом, о чем свидетельствует полученный коэффициент достоверности.

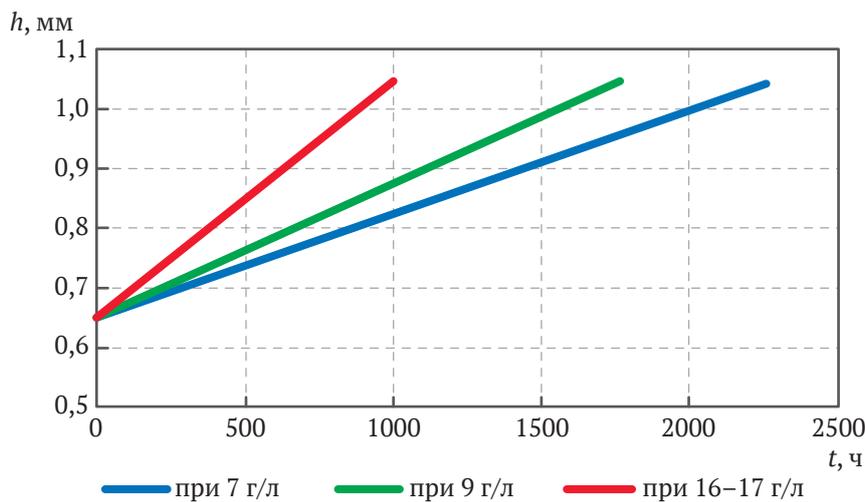


Рис. 8. Радиальный зазор в щелевых уплотнениях в зависимости от наработки секционного насоса

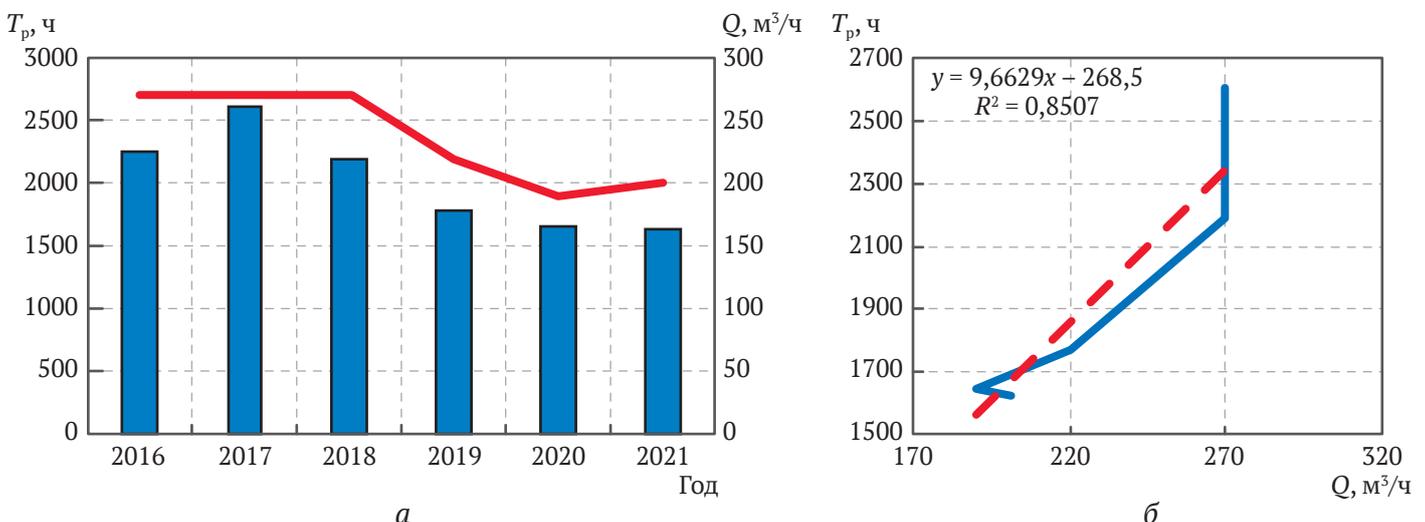


Рис. 9. Динамика изменения среднего ресурса секционного насоса до капитального ремонта и его подачи на момент вывода в капитальный ремонт по годам (а) и зависимость между данными параметрами (б)

Снижение подачи Q в период 2019–2021 гг. аргументировалось в Компании недопущением значительного повышения количества выполняемых капитальных ремонтов насосного оборудования в связи с существенным повышением фактора X_6 . Согласно результатам корреляционно-регрессионного анализа вышеназванные параметры имеют тесную взаимосвязь (рис. 10).

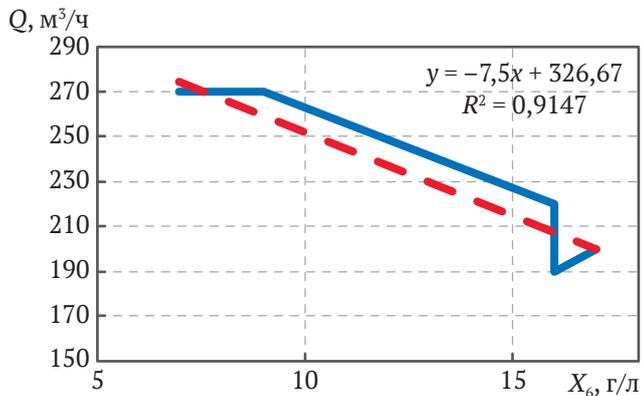


Рис. 10. Зависимость подачи секционного насоса на момент вывода в капитальный ремонт от усредненной концентрации механических примесей в шахтных водах

Таким образом, межремонтный ресурс секционных насосов рассматриваемой водоотливной установки может быть рассчитан как линейная функция их подачи на момент вывода в капитальный ремонт Q , изменение которой с высокой степенью достоверности описывается эмпирическим выражением $Q = -7,5X_6 + 326,67$.

Оценка энергетической эффективности секционных насосов при откачке абразивного потока шахтной воды

Лабораторные исследования (рис. 11, а), выполненные согласно методике [15], показали, что потребляемая мощность P центробежного одноступенчатого насоса при значительном падении подачи Q (на 26 %) из-за износа деталей проточной части снижается достаточно плавно – на 13 %. При этом из рис. 11, б видно, что такое снижение подачи Q сопровождается значительным падением напора H .

В свою очередь, снижение подачи секционного насоса рассматриваемой водоотливной установки на 20...23 % от ее номинального значения из-за интенсивного износа щелевых уплотнений приводит к падению потребляемой электроэнергии на 6,5 % (рис. 12, а). Такое более плавное снижение потребляе-

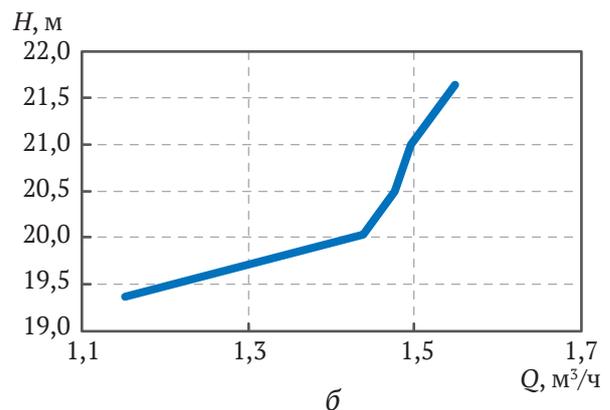
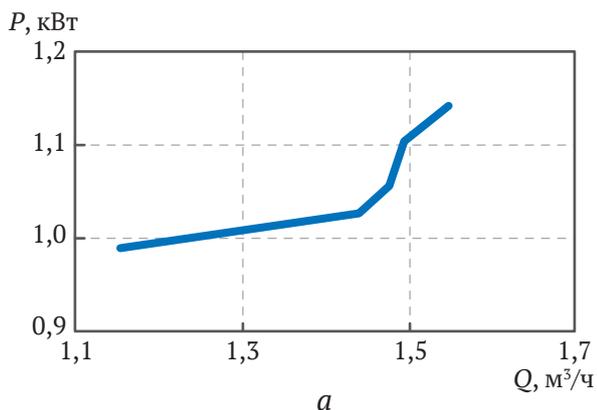


Рис. 11. Зависимости потребляемой мощности (а) и напора (б) от подачи одноступенчатого насоса

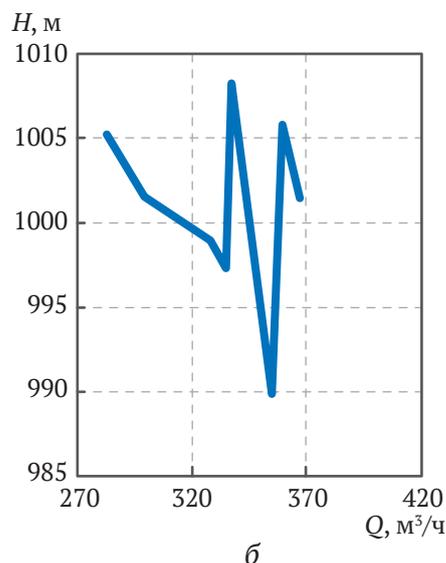
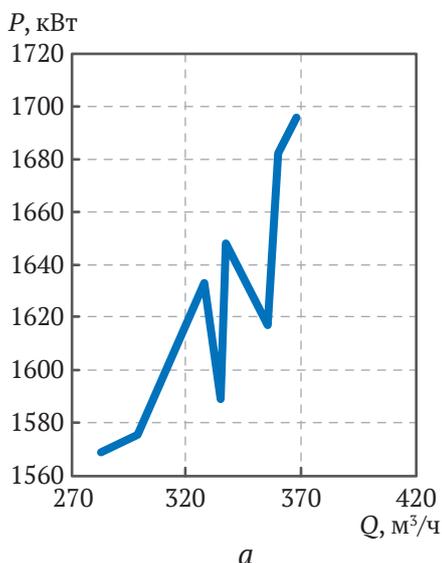


Рис. 12. Зависимости потребляемой мощности (а) и напора (б) от подачи секционного насоса



мой электроэнергии секционным насосом при разных подачах по сравнению с одноступенчатым насосом объясняется относительным постоянством величины напора (997...1008 м), что вызвано слабым износом лопаток рабочих колес, отвечающих за развиваемые им подачу и напор, в связи с малым размером перекачиваемых твердых частиц (рис. 12, б). Основная доля механических примесей (80...85 %) представлена классом минус 0,05 мм.

Согласно [16] количество механических примесей ε , контактирующих с лопатками рабочего колеса центробежного насоса, напрямую зависит от их размера d :

$$\varepsilon = 0,4 \sqrt{\frac{0,75}{1 + 0,35 \cdot \frac{\rho_{ТВ}}{\Delta\rho} \cdot \frac{D}{d}}}, \quad (2)$$

где $\rho_{ТВ}$ – плотность механических примесей, $\Delta\rho$ – разность плотностей механических примесей и чистой воды, D – диаметр рабочего колеса, d – размер твердой частицы.

Другими словами, наиболее мелкие твердые частицы увлекаются потоком шахтной воды, не вступая при этом в контакт с лопатками рабочего колеса.

Таким образом, видно, что откачка шахтной воды секционными насосами с изношенными щелевыми уплотнениями займет значительно большее количество времени по сравнению с новым или отремонтированным насосом, при этом его потребляемая мощность слабо уменьшается, что в конечном итоге обязательно приведет к существенному суммарному повышению электропотребления. Все это свидетельствует о нецелесообразности длительной работы секционных насосов при малых подачах с точки зрения энергоэффективности.

Обсуждение результатов исследований

Выполненные исследования подтвердили негативное воздействие интенсивного гидроабразивного изнашивания щелевых уплотнений на работоспособность секционных насосов. Как видно из рис. 13, влияние фактора X_6 на суммарные затраты по основным статьям расходов S (затраты на выполнение капитальных ремонтов и электропотребление) секционных насосов рассматриваемой водоотливной установки

с высокой степенью достоверности описывается эмпирическим выражением $S = 7,6835X_6 + 49,577$. В соответствии с этим выражением установлено, что снижение концентрации механических примесей в шахтных водах с 17 до 4 г/л позволит уменьшить годовые затраты на эксплуатацию насосного оборудования главной водоотливной установки рудника «Удачный» на 100 млн рублей.

С учетом такого ожидаемого экономического эффекта от снижения твердой фазы шахтных вод капитальные вложения на проходку двух проектных осветляющих резервуаров в размере 340 млн рублей будут возмещены (окуплены) менее чем через 3,5 года.

Заключение

На основании всего вышеизложенного материала сделаны следующие основные выводы:

1. Межремонтный ресурс секционных насосов главной водоотливной установки подземного рудника «Удачный» может быть рассчитан как линейная функция их подачи на момент вывода в капитальный ремонт, изменение которой с высокой степенью достоверности описывается эмпирическим выражением $Q = -7,5X_6 + 326,67$, где X_6 – усредненная концентрация механических примесей в шахтных водах.

2. Снижение подачи секционного насоса на 20...23 % от номинального значения из-за интенсивного износа щелевых уплотнений приводит к падению потребляемой электроэнергии на 6,5 %. Такое медленное снижение потребляемой электроэнергии секционным насосом при разных подачах объясняется относительным постоянством величины напора (997...1008 м), что вызвано слабым износом лопаток рабочих колес вследствие малого размера основной доли перекачиваемых твердых частиц, представленных классом минус 0,05 мм.

3. Расчетным путем установлено, что снижение концентрации механических примесей в шахтных водах с 17 до 4 г/л позволит уменьшить годовые затраты на эксплуатацию насосного оборудования главной водоотливной установки рудника «Удачный» на 100 млн рублей. Таким образом, окупаемость проходки двух проектных осветляющих резервуаров, обеспечивающих такое значительное снижение твердой фазы шахтных вод, составит менее 3,5 лет.

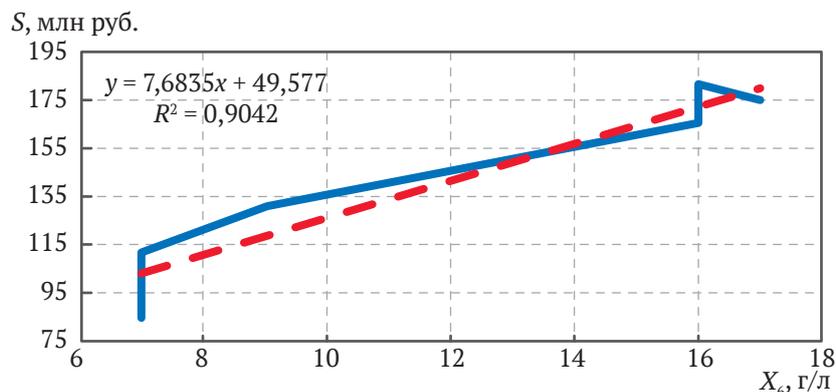


Рис. 13. Зависимость суммарных затрат на выполнение капитальных ремонтов и электропотребление насосного оборудования от усредненной концентрации механических примесей в шахтных водах



Список литературы

1. Овчинников Н. П., Зырянов И. В. Оценка долговечности секционных насосов подземных кимберлитовых рудников АК «АЛРОСА». *Горный журнал*. 2017;(10):41–44. <https://doi.org/10.17580/gzh.2017.10.08>
2. Овчинников Н. П. Проблемы эксплуатации электронасосных агрегатов секционного типа на кимберлитовых рудниках АК «АЛРОСА» и пути их решения. *Известия Томского Политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2018;329(6):66–73. URL: <http://izvestiya.tpu.ru/archive/article/view/2046>
3. Долганов А. В. Влияние гидроабразивного износа элементов проточной части на эксплуатационные качества центробежных насосов медно-колчеданных рудников. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2015;(8):181–186.
4. Shen Z., Li R., Han W., Quan H. Erosion wear in impeller of double-suction centrifugal pump due to sediment flow. *Journal of Applied Fluid Mechanics*. 2020;13(4):1131–1142. <https://doi.org/10.36884/jafm.13.04.30907>
5. Serrano R., Santos L., Viana E., Martinez C. B. Case study: Effects of sediment concentration on the wear of fluvial water pump impellers on Brazil's Acre River. *Wear*. 2018;408–409:131–137. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2018.04.018>
6. Паламарчук Н. В., Тимохина В. Ю., Паламарчук Т. Н. Причины неудовлетворительной работы автоматических уравнивающих устройств центробежных высоконапорных насосов. *Сборник научных трудов Донецкого института железнодорожного транспорта*. 2016;(42):65–71.
7. Бородкин Н. Н., Паламарчук Т. Н., Захаров В. А. Выбор и расчет базовых параметров центробежных насосов для определения начального этапа кавитации. *Сборник научных трудов Донецкого института железнодорожного транспорта*. 2019;(52):82–91.
8. Тимохин Ю. В., Паламарчук Н. В. Результаты исследований осевой силы ротора и параметров автоматических уравнивающих устройств центробежных секционных насосов. *Сборник научных трудов Донецкого института железнодорожного транспорта*. 2017;(45):32–42.
9. Долганов А. В., Ислентьев А. О., Торопов Э. Ю., Чураков Е. О. Анализ эффективности разгрузочных устройств шахтных центробежных секционных насосов. *Известия Уральского государственного горного университета*. 2014;(2):31–35. URL: <http://www.iuggu.ru/download/2014-2-Dolganov.pdf>
10. Долганов А. В., Тимухин С. А. *Гидроабразивный износ насосов рудничного водоотлива*: Монография. М.: Издательский дом Академии Естествознания; 2016. 180 с.
11. Сосновский С. В., Селькин В. П. Влияние перекачиваемой среды на интенсивность изнашивания щелевых уплотнений центробежных насосов. *Трение и износ*. 2013;34(2):171–174. (Пер. вер.: Sosnovskii S. V., Sel'kin V. P. Effect of transfer medium on wear rate of groove seals of centrifugal pumps. *Journal of Friction and Wear*. 2013;34(2):134–136.)
12. Островский В. Г., Пещеренко С. Н. Расчет скорости гидроабразивного износа межступенчатых уплотнений нефтяного насоса. *Вестник Пермского национально-исследовательского политехнического института. Геология. Нефтегазовое дело*. 2012;(5):70–75. URL: <https://ered.pstu.ru/index.php/geo/article/view/1072/553>
13. Островский В. Г., Пещеренко С. Н. Стендовое моделирование коррозионно-абразивного разрушения направляющих аппаратов нефтяных насосов. *Научные исследования и инновации*. 2010;4(1):86–88.
14. Литвиненко К. В. *Прогнозирование технического состояния УЭЦН в условиях интенсивного выноса мехпримесей*. [Автореф. дис... канд. техн. наук.] Екатеринбург: Уфимский государственный нефтяной технический университет; 2016. 24 с.
15. Овчинников Н. П., Викулов М. А., Довиденко Г. П., Бочкарев Ю. С. Экспериментальные исследования эксплуатационных свойств насосной установки с изношенным рабочим колесом. *Горный журнал*. 2016;9:61–65. <https://doi.org/10.17580/gzh.2016.09.17>
16. Меньшиков С. С. *Повышение эффективности эксплуатации грунтовых насосов в условиях гидроабразивного износа*. [Автореф. дис... канд. техн. наук.] СПб.: Национальный минерально-сырьевой университет «Горный»; 2014. 20 с.

References

1. Ovchinnikov N. P., Zyryanov I. V. Assessment of durability of sectional pumps in underground kimberlite mines of ALROSA. *Gornyi Zhurnal*. 2017;(10):41–44. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/gzh.2017.10.08>
2. Ovchinnikov N. P. Problems of operation of electric pumping sectional type units on kimberlite mines of Alrosa and the ways of their solution. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2018;329(6):66–73. (In Russ.) URL: <http://izvestiya.tpu.ru/archive/article/view/2046>
3. Dolganov A. V. The influence of hydro-abrasive depreciation of excretory elements on exploitation qualities of rotary pumps at copper and pyrites pits. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2015;(8):181–186. (In Russ.)
4. Shen Z., Li R., Han W., Quan H. Erosion wear in impeller of double-suction centrifugal pump due to sediment flow. *Journal of Applied Fluid Mechanics*. 2020;13(4):1131–1142. <https://doi.org/10.36884/jafm.13.04.30907>



5. Serrano R., Santos L., Viana E., Martinez C.B. Case study: Effects of sediment concentration on the wear of fluvial water pump impellers on Brazil's Acre River. *Wear*. 2018;408–409:131–137. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2018.04.018>
6. Palamarchuk N., Timokhina V.J., Palamarchuk T.N. Causes of unsatisfactory operation of the automatic balancing devices of centrifugal high-pressure pumps. *Sbornik nauchnykh trudov Donetskogo instituta zheleznodorozhnogo transporta*. 2016;(42):65–71. (In Russ.)
7. Borodkin N.N., Palamarchuk T.N., Zakharov V.A. Selection and calculation of the basic modes of the parameters of centrifugal pumps to determine the initial stage of cavitation. *Sbornik nauchnykh trudov Donetskogo instituta zheleznodorozhnogo transporta*. 2016;(42):65–71. (In Russ.)
8. Timohin J.W., Palamarchuk T.N. The research results of the axial forces of the rotor and automatic settings. *Sbornik nauchnykh trudov Donetskogo instituta zheleznodorozhnogo transporta*. 2017;(45):32–42. (In Russ.)
9. Dolganov A., Islentyev A.O., Toropov E.Yu., Churakov E.O. Analysis of effectiveness of dumping devices of mine centrifugal sectional pumps. *News of the Ural State Mining University*. 2014;(2):31–35. (In Russ.) URL: <http://www.iuggu.ru/download/2014-2-Dolganov.pdf>
10. Dolganov A.V., Timukhin S.A. *Hydroabrasive wear of mine drainage pumps*. Monograph. Moscow: Publishing House of Academy of Natural Sciences; 2016. 180 p. (In Russ.)
11. Sosnovskii S.V., Sel'kin V.P. Effect of transfer medium on wear rate of groove seals of centrifugal pumps. *Journal of Friction and Wear*. 2013;34(2):134–136. (Orig. ver.: Sosnovskii S.V., Sel'kin V.P. Effect of transfer medium on wear rate of groove seals of centrifugal pumps. *Treniye i iznos*. 2013;34(2):171–174. (In Russ.)
12. Ostrovskij V.G., Pesherenko S.N. Calculations of the rate hydroabrasive wear interstage seal oil pump. *Perm Journal of Petroleum and Mining Engineering*. 2012;(5):70–75. (In Russ.) URL: <https://red.pstu.ru/index.php/geo/article/view/1072/553>
13. Ostrovsky V.G., Pescherenko S.N. Test bench simulation of corrosion-abrasive disruption of oil pumps guide apparatuses. *Nauchnye Issledovaniya i Innovatsii*. 2010;4(1):86–88. (In Russ.)
14. Litvinenko K.V. *Forecasting ESP technical condition under intensive removal of mechanical impurities*. [Ph.D. thesis in Engineering Science]. Yekaterinburg: Ufa State Oil Technical University; 2016. 24 p. (In Russ.)
15. Ovchinnikov N.P., Vikulov M.A., Bochkarev Yu.S., Dovidenko G. P. Experimental studies of operating properties of pumping unit with worn impeller. *Gornyi Zhurnal*. (In Russ.) 2016;9:61–65. <https://doi.org/10.17580/gzh.2016.09.17>
16. Menshikov S.S. Improving operating efficiency of suction dredges under conditions of hydroabrasive wear. [Ph.D. thesis in Engineering Science]. St. Petersburg: "Gorny" National Mineral Resource University; 2014. 20 p. (In Russ.)

Информация об авторе

Николай Петрович Овчинников – кандидат технических наук, доцент, директор Горного института, Северо-Восточный федеральный университет им. М. К. Аммосова, г. Якутск, Российская Федерация; ORCID [0000-0002-4355-5028](https://orcid.org/0000-0002-4355-5028), Scopus ID [57191629443](https://scopus.org/57191629443); e-mail ovchinnlar1986@mail.ru

Information about the author

Nickolay P. Ovchinnikov – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Director of the Mining Institute, M.K. Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russian Federation; ORCID [0000-0002-4355-5028](https://orcid.org/0000-0002-4355-5028), Scopus ID [57191629443](https://scopus.org/57191629443); e-mail ovchinnlar1986@mail.ru

Поступила в редакцию	11.01.2022	Received	11.01.2022
Поступила после рецензирования	22.01.2022	Revised	22.01.2022
Принята к публикации	01.05.2022	Accepted	01.05.2022