

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ КАРЬЕРНЫХ ЭКСКАВАТОРОВ ПО ДОЛЕ РЕМОНТНЫХ ПРОСТОЕВ

А.Э. Салимов¹, С.Л. Иванов¹

¹ Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II,
Санкт-Петербург, Россия, e-mail: salimoff.abbas@gmail.com

Аннотация: Представлены результаты анализа данных мониторинга технического состояния и работ по техническому обслуживанию и ремонту карьерных экскаваторов ЭКГ-20 при добыче медных руд в условиях карьеров Республики Узбекистан. Основное внимание уделено анализу влияния стратегий технического обслуживания и ремонта на надежность и производительность оборудования. Предложен коэффициент КТОиР, отражающий соотношение плановых и аварийных ремонтных простоев, который служит критерием оценки эффективности системы технического обслуживания и ремонта. На основе данных мониторинга экскаваторов выявлено среднее значение коэффициента КТОиР для принятой на карьере стратегии технического обслуживания и ремонта. Значение данного коэффициента свидетельствует об уровне и качестве управления техническим состоянием оборудования. Установлены законы распределения отказов и месячной наработки экскаваторов. Приводится обоснование выводов, согласно которым увеличение доли плановых мероприятий снижает вероятность внеплановых простоев, однако их эффективность зависит от интенсивности эксплуатации и качества организации работ. Проведенное исследование позволяет количественно охарактеризовать коэффициент КТОиР для экскаваторов и выявить статистические закономерности, отражающие их фактическое состояние и надежность работы. Обоснован выбор комбинированной стратегии технического обслуживания и ремонта, интегрирующей элементы предиктивной аналитики и концепции CM&R (Conscientious Maintenance and Repair), что позволяет оптимизировать затраты и повысить надежность оборудования. Полученные данные могут быть использованы для разработки адаптивных систем управления техническим состоянием экскаваторов в сложных горно-геологических условиях.

Ключевые слова: карьерные экскаваторы, наработка, ремонтные простои, техническое обслуживание и ремонт (ТОиР), внеплановые простои, добросовестное техническое обслуживание, коэффициент технического обслуживания и ремонта.

Для цитирования: Салимов А. Э., Иванов С. Л. Оценка эффективности технического обслуживания карьерных экскаваторов по доле ремонтных простоев // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2026. – № 5. – С. 52–65. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_5_0_52.

Evaluation of the efficiency of maintenance of quarry excavators by the share of repair downtime

A.E. Salimov¹, S.L. Ivanov¹

¹ Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint-Petersburg, Russia, e-mail: salimoff.abbas@gmail.com

Abstract: This article presents the results of an analysis of data from monitoring the technical condition and maintenance and repair work performed on EKG-20 open-pit copper ore mining excavators in the open pit mines of the Republic of Uzbekistan. The article focuses on the impact of maintenance and repair (M&R) strategies on equipment reliability and performance. A M&R coefficient reflecting the ratio of scheduled to emergency repair downtime is proposed, which serves as a criterion for assessing the effectiveness of the M&R system. Based on excavator monitoring data, the average M&R coefficient was determined for the M&R strategy adopted at the quarry. This coefficient indicates the level and quality of equipment technical condition management. Failure distribution patterns and monthly operating time of excavators are established. A rationale is provided for the conclusion that increasing the proportion of scheduled activities reduces the likelihood of unscheduled downtime; however, their effectiveness depends on the intensity of operation and the quality of work organization. The conducted study allows us to quantitatively characterize the M&R coefficient for excavators and identify statistical patterns reflecting their actual condition and reliability. The study substantiates the choice of a combined maintenance and repair strategy integrating elements of predictive analytics and the CM&R (Conscientious Maintenance and Repair) concept, which optimizes costs and improves equipment reliability. The obtained data can be used to develop adaptive systems for managing the technical condition of excavators in challenging mining and geological conditions.

Key words: quarry excavators, operating time, repair downtime, maintenance and repair (MRO), unscheduled downtime, conscientious maintenance, maintenance and repair coefficient.

For citation: Salimov A. E., Ivanov S. L. Evaluation of the efficiency of maintenance of quarry excavators by the share of repair downtime. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2026;(5):52-65. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_5_0_52.

Введение

Современные требования к эффективности и устойчивости горнодобывающих предприятий обуславливают необходимость применения надежной, высокопроизводительной техники, способной функционировать в условиях интенсивных нагрузок в реальных горно-геологических условиях [1 – 3]. Эффективность работы горнодобывающих предприятий во многом зависит от надежности эксплуатируемой техники и уровня ее технического обслуживания. Одной из ключевых технологических

горных машин при разработке медных руд открытым способом является экскаватор типа ЭКГ [4 – 6]. Физико-механические особенности горных пород, разрабатываемых на медных карьерах, во многом определяют условия функционирования экскаваторов. Для таких массивов характерны высокая твердость (по шкале профессора М.М. Протодяконова – от 10 до 16) и абразивность горных пород, плотность в целом которых составляет 1,94 – 2,59 т/м³, при средней насыпной плотности 1,7 – 1,8 т/м³, усугубляемая суровыми резо

континентальными климатическими условиями внешней среды [7, 8]. Кусковатость 300–500 мм, с незначительным объемом фракции 800–1200 мм. Коэффициент разрыхления при работе экскаватора составляет 1,2, а коэффициент наполнения ковша 0,97. Эти факторы обуславливают интенсивное деградиционное воздействие на рабочее оборудование экскаватора, в первую очередь на ковш, зубья, рукоять и связанные с ними механизмы подъема рукояти и напора ковша [9–11]. В этих условиях возрастает риск преждевременного выхода из строя ресурсопределяющих элементов и потеря экскаватором работоспособности.

Обзор литературы и методы исследования

При нарушении технологического процесса копания, включая заглубление ковша, неэффективную траекторию его движения, возрастает риск перегрузок, которые ведут к повышению интенсивности изнашивания элементов, развитию скрытых дефектов и имеющихся повреждений, что влечет за собой аварийные отказы и, соответственно, внеплановые простои горного оборудования [12–14].

Результаты исследований и аналитических изысканий 2023–2025 гг. свидетельствуют о том, что около 50% внеплановых простоев экскаваторов обусловлены низким качеством технического обслуживания, а еще 36% — непосредственно связаны с нарушениями технологических режимов [15–17].

Одним из наиболее важных этапов в подходе к сокращению количества внеплановых простоев является адекватный выбор стратегии технического обслуживания и ремонта (ТОиР) оборудования [18–20]. Существующие подходы к организации технического обслуживания оборудования в горнодобывающей про-

мышленности опираются на экономическую целесообразность проведения ремонтов.

1. Выберем в качестве базы для сравнения стратегий ТОиР относительную величину затрат на производство ремонта и технического обслуживания — стратегию по факту отказа. Эта стратегия характеризуется тем, что ремонтно-восстановительные мероприятия проводятся только после отказа. Относительная величина затрат для этой стратегии принята равной единице (1,0) [20], как это было указано выше. Такая модель характеризуется высокой вероятностью внеплановых простоев [21–23].

2. Предупредительная стратегия (0,8) [20] — основана на реализации комплекса профилактических технических и организационных мероприятий, направленных на систематическое обслуживание, контроль и эксплуатационный надзор за состоянием узлов и агрегатов для предупреждения отказов оборудования [24].

3. Стратегия проведения профилактических мероприятий по фактическому состоянию (0,48) [20], которое регламентирует проведение ремонтных работ в зависимости от текущего технического состояния оборудования.

4. Комбинированная стратегия (0,32) [20] интегрирует диагностику состояния (как в стратегии 3) с плановыми профилактическими мероприятиями (как в стратегии 2), но требует систему мониторинга параметров оборудования в реальном времени (система CM&R) и направлена на достижение рационального баланса между надежностью, затратами на обслуживание и наработкой [25–27]. Такая стратегия позволяет гибко адаптировать системы ТОиР к конкретным условиям функционирования оборудования и особенностям производственного процесса, широко применять современные цифровые технологии. Ука-

занный подход относят к предиктивным технологиям, когда на базе учета текущего состояния прогнозируется вероятность отказа в будущем [28–30].

В современных условиях предпочтительной является комбинированная стратегия и способы ее реализации как наиболее гибкий и эффективный путь поддержания оборудования в работоспособном состоянии. Одним из таких способов реализации данной стратегии является система CM&R (Conscientious Maintenance and Repair) [13, 31, 32].

В рамках предлагаемой системы применительно к карьерным экскаваторам рассматривается критерий оценки эффективности проведения мероприятий технического обслуживания и ремонта в виде коэффициента технического обслуживания и ремонта $K_{\text{ТОиР}}$ вне зависимости от применяемой стратегии и способа проведения ТОиР, определяемого как отношение времени ремонтных простоев, связанных с выполнением планового технического обслуживания, ко времени совокупных простоев, включающих как плановые мероприятия, так и ликвидацию аварийных отказов:

$$K_{\text{ТОиР}} = \frac{T_{\Sigma\text{ТО}}}{T_{\Sigma\text{ТО}} + T_{\Sigma\text{АП}}}, \quad (1)$$

где $T_{\Sigma\text{ТО}}$ – суммарное время простоев, обусловленных проведением планового технического обслуживания; $T_{\Sigma\text{АП}}$ – суммарное время простоев при устранении аварийных отказов.

При больших значениях этого коэффициента, стремящихся к единице, доминирует время ремонтных простоев, связанных с плановыми мероприятиями, что свидетельствует о высоком уровне управляемости техническим состоянием оборудования и профилактики аварийных отказов.

Малые значения коэффициента, напротив, указывают на преобладание вне-

плановых остановок вследствие аварий, что отражает недостаточность превентивных мер и низкую эффективность реализуемой системы ТОиР.

Таким образом, коэффициент $K_{\text{ТОиР}}$ может быть использован в качестве одного из ключевых критериев при сравнительном анализе различных концепций технического обслуживания, а также при обосновании выбора рациональной системы ТОиР для конкретных условий эксплуатации, совместно с оценкой рисков отказов. Для оценки рисков, производимой в процессе диагностики оборудования, применен принцип Файн-Кинни [13]. Данные мониторинга технического состояния экскаваторов ЭКГ-20, функционирующих на карьерах Узбекистана, показывают, что, по экспертным оценкам, в 2023 г. вероятность их отказа составляла от 0,1 до 0,3. Основная идея заключается в численной оценке риска потенциальной опасности выявленных повреждений или дефектов, определяемой как произведение вероятности отказа, величины остаточного ресурса эксплуатируемого элемента и последствий, к которым этот отказ может привести. Все три составляющих оцениваются в безразмерных баллах. Шкала вероятностей была выбрана в соответствии с ГОСТ Р 27.601-2011 «Надежность. Анализ видов, последствий и критичности отказов» и адаптирована для горнодобывающей промышленности на основе опыта авторов и анализа источников [13, 16, 19]: 10 – скорее всего, произойдет; 6 – очень вероятно; 3 – нехарактерно, но возможно; 1 – маловероятно; 0,5 – вряд ли возможно; 0,2 – почти невозможно; 0,1 – фактически невозможно.

Относительной величине остаточного ресурса, определяемой отношением величины безаварийной работы к межремонтному интервалу или интервалу замены элемента (узла, подсистемы) по графику ТОиР, соответствуют баллы:

10 – меньше 0,6; 6 – больше 0,6; 3 – больше 0,7; 2 – равная 1,0; 1 – больше 1,0; 0,5 – больше 2,0.

Последствия отказа: 100 – высокая степень угрозы безопасности людей и/или экономических потерь и/или окружающей среде; 40 – отказ представляет угрозу безопасности людей или окружающей среды или значительных экономических потерь; 15 – высокая степень недовольства потребителя, изделие не может быть использовано по назначению, но угрозы безопасности отказ не представляет; 7 – отказ приводит к заметному для потребителя снижению эксплуатационных характеристик и/или к неудобству применения изделия; 3 – последствия отказа незначительны, но потребитель может выразить недовольствие его появлением; 1 – отказ не приводит к заметным последствиям (ГОСТ 27.310-95).

Результаты

Для рудных карьеров Республики Узбекистан принята предупредительная стратегия, реализуемая в рамках системы планово-предупредительных ремон-

тов. Эта система базируется на статистических данных историй отказов аналогичного оборудования и планировании проведения ремонтов до наступления статистически возможного отказа. Однако опыт эксплуатации показывает, что и при таком подходе нельзя исключать полностью вероятность отказа [22]. Для анализа применимости коэффициента технического обслуживания и ремонта были выбраны 20 экскаваторов ЭКГ-20К, отработавших в условиях медных карьеров. По состоянию на 2023 г. в среднем наблюдалось 196,88 ч внеплановых простоев на один экскаватор в год при плановых ремонтах 755,25 ч, при этом среднее значение $K_{ТОИР}$ составило 0,8.

База количества помесячных отказов 20 взятых под наблюдение экскаваторов представляет собой пуассоновский поток событий, обладающий свойствами стационарности, ординарности и отсутствием последствий, причинами которых, как правило, является превышение критических нагрузок, вызванных как внутренними причинами (конструктивные дефекты, усталость материалов), так

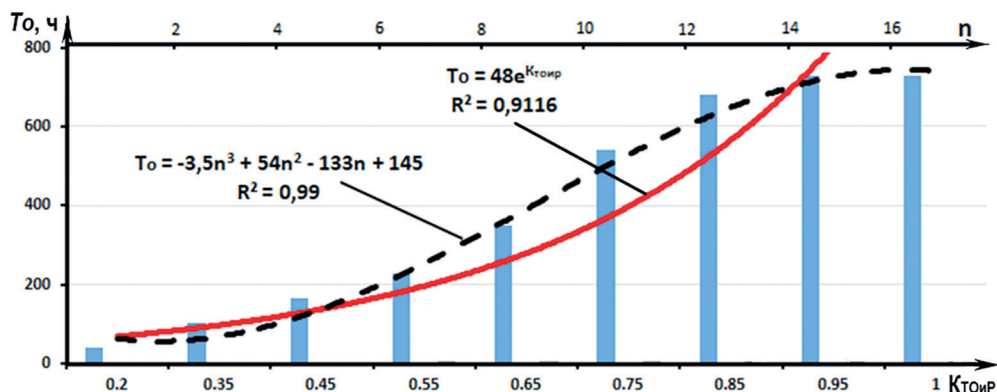


Рис. 1. Взаимосвязь продолжительности наработки между отказами T_0 с величиной коэффициента $K_{ТОИР}$ и частотой появления интервальных значений n величин помесячной наработки между отказами в 2023 г. [составлено авторами]

Fig. 1. The relationship of the operating time between maintenance failures with the value of the $K_{ТОИР}$ coefficient and the frequency of occurrence of interval values of n monthly operating time between failures in 2023 [compiled by the authors]

и внешними, в том числе нарушениями технологических режимов (часто обусловленными ошибками оператора). При этом функциональная зависимость значений наработки между отказами ТОО, фиксировавшимися на протяжении каждого месяца для находящихся под наблюдением экскаваторов, и соответствующими им значениями коэффициента $K_{\text{ТОиР}}$ может быть аппроксимирована показательной функцией (рис. 1). Вместе с тем распределение частоты появления интервальных значений n (см. рис. 1) величин помесечной наработки между отказами — неравномерно и смещено к значениям, превышающим 320 ч. Что касается качества проведения предупредительных мероприятий ТООиР, то по мере увеличения значения $K_{\text{ТОиР}}$ наблюдается устойчивый рост величины наработки оборудования, что указывает на достаточность и качество проводимых плановых мероприятий, повышает надежность работы экскаватора, снижая вероятность отказов и соответствующих им простоев.

Этот подход позволяет корректно учесть эффект снижения предельной полезности дополнительных мероприятий ТООиР: при низких значениях $K_{\text{ТОиР}}$ даже небольшое снижение аварийных отказов дает существенный прирост эффективности, тогда как при высоких значениях дополнительное улучшение требует все больших затрат [31]. Это дает основание применять данную зависимость для обоснования рационального диапазона значений коэффициента $K_{\text{ТОиР}}$, обеспечивающих приемлемое соотношение затрат и эксплуатационной отдачи.

На медных карьерах Республики Узбекистан имеет место достаточно высокий уровень проведения мероприятий ТООиР, который выполняется практически в полном объеме. Вместе с тем значительное удаление от территории

завода-изготовителя, наличие административных и государственных границ требуют сверхнормативных запасов запчастей, инструментов и принадлежностей. Среднемесячная производительность экскаватора ЭКГ 20К для этих условий составляет около 200 тыс. м³.

Наименее надежными узлами карьерного экскаватора являются рабочее оборудование, механизмы подъема и напора. При этом количество отказов подъемной лебедки выше, чем лебедки напора, что обусловлено большей энерговооруженностью и загруженностью механизма подъема. Основными элементами, ведущими к отказам лебедок и ограничивающими величину их наработки между отказами, являются упругие муфты, электродвигатели и редукторы механизмов, что говорит о необходимости дополнительного диагностического контроля этих элементов. Кроме указанных выше отказов в механизмах подъема и напора протекают процессы интенсивного изнашивания тормозных шкивов и ручьев барабанов лебедок, у последних он сопровождается заострением их гребней.

На рис. 2 представлено распределение месячной наработки экскаваторов, полученное в результате мониторинга эксплуатационных данных по 20 экскаваторам.

Распределение значений имеет форму, приближенную к нормальной, что подтверждается аппроксимацией соответствующей кривой Гаусса [31]. Среднее значение наработки Q составляет $171,517 \cdot 10^3$ м³, среднеквадратическое отклонение — $53,74 \cdot 10^3$ м³.

Сгруппированные значения демонстрируют умеренный разброс, характерный для техники, эксплуатируемой в условиях различной интенсивности нагрузки. Невысокая эксплуатационная производительность экскаваторов при частичной загрузке оборудования гово-

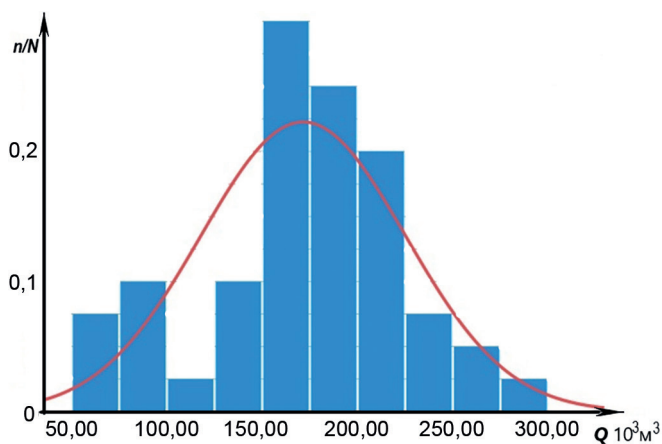


Рис. 2. Диаграмма значений усредненной месячной эксплуатационной наработки экскаватора [составлено авторами]

Fig. 2. Diagram of the values of the average monthly operating time of the excavator [compiled by the authors]

рит о низком коэффициенте использования чистого сменного времени работы экскаватора, что связано с политикой предприятия, и недостаточном фронте работ, так как предприятие еще не вышло на проектную мощность. При этом интенсивность расходования ресурса экскаваторами также снижается, что ведет к увеличению сроков их службы и снижению потока отказов.

На рис. 3 показано распределение эксплуатационной производительности q .

Представленные на рисунке данные подтверждают невысокую интенсивность производимых экскавационных работ.

Расчетные значения демонстрируют симметричное распределение, близкое к нормальному, с модальным и средним значением около $0,35 \cdot 10^3 \text{ м}^3/\text{ч}$ и среднеквадратическим отклонением порядка $0,066 \cdot 10^3 \text{ м}^3/\text{ч}$. Разброс значений производительности отражает влияние комплекса эксплуатационных факторов, включая варьирующиеся параметры горных

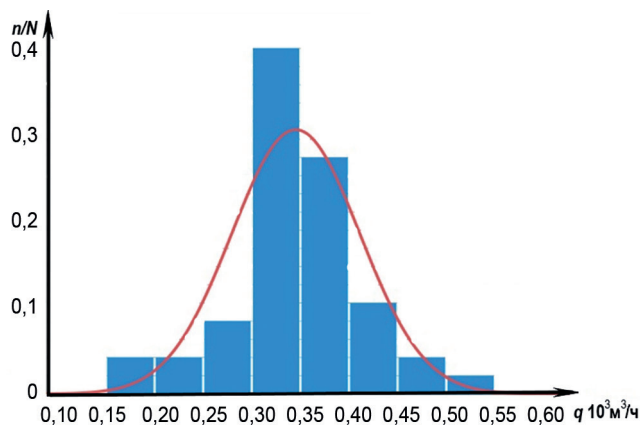


Рис. 3. Диаграмма значений усредненной почасовой эксплуатационной производительности экскаватора [составлено авторами]

Fig. 3. Diagram of the values of the average hourly operating productivity of the excavator [compiled by the authors]

условий, уровень квалификации операторов и точность соблюдения технологических режимов копания. Сглаженность кривой указывает на относительную стабильность функционирования оборудования при допустимом уровне вариации.

Показатели производительности экскаватора тесно связаны с интенсивностью его эксплуатации, которая, в свою очередь, отражается в объемах наработки за расчетный период. Для комплексной оценки функционирования машинного парка необходимо учитывать не только мгновенные или средние значения выработки, но и распределение наработки по всем единицам оборудования. Такой подход позволяет выявить отклонения от нормативных режимов, оценить уровень загрузки техники и риски отказов [33–35].

Обсуждение результатов

Результаты, полученные в ходе исследования, позволяют провести комплексную оценку эксплуатационной эффективности экскаваторов ЭКГ-20К в условиях разработки медных руд с позиции как технической устойчивости, так и оптимальности реализуемой стратегии технического обслуживания и ремонта.

Анализ распределения коэффициента технического обслуживания и ремонта ($K_{\text{ТОиР}}$), проведенный по совокупности данных о функционировании 20 экскаваторов, выявил экспоненциальный характер распределения, что позволяет трактовать отказоустойчивость парка машин в рамках пуассоновской модели потока событий. Такая модель особенно релевантна для горнодобывающей отрасли, где внеплановые отказы оборудования могут быть вызваны как внутренними конструктивными или производственными факторами, так и внешними причинами. Подобные выводы согласу-

ются с результатами предыдущего исследования авторов [13, 25], в котором была предложена классификация факторов, критичных для обеспечения надежности карьерных экскаваторов, оценивались риски отказов карьерного оборудования.

На текущем этапе определены предельные и наиболее вероятные значения $K_{\text{ТОиР}}$, а также проанализирована их связь с показателями эксплуатационной производительности и месячной наработки. Установлено, что оба последних параметра подчиняются нормальному распределению, что указывает на устойчивость функционирования большинства экскаваторов при допустимом уровне отклонений. Однако отчетливо прослеживается недостаточность загрузки оборудования. Невысокие значения производительности связаны не только с геологическими условиями, но и с индивидуальной квалификацией операторов и организацией работ. Что касается применения системы планово-предупредительных ремонтов для указанных условий, то при имеющем месте эффективным техническом обслуживании парка экскаваторов эта система является чрезмерно затратной. При этом высокая отказоустойчивость оборудования вызвана не столько проведением мероприятий ТОиР, столько сравнительно низкой интенсивностью ведения горных работ и, соответственно, загрузкой оборудования.

Таким образом, проведенное исследование не только подтверждает выводы предыдущей работы авторов, но и расширяет их за счет количественного анализа эксплуатационных характеристик. Это позволяет перейти от обобщенных представлений о причинах отказов к формированию управляемых и измеряемых критериев оценки эффективности систем ТОиР. В частности, полученные данные служат обоснованием

для внедрения комбинированной стратегии технического обслуживания, дополненной концепцией CM&R (Conscientious Maintenance and Repair), предложенной авторами ранее. Данная концепция ориентирована на прогнозирование рисков отказов, управление остаточным ресурсом и оптимизацию затрат за счет приоритизации плановых мероприятий [36, 37].

В перспективе интеграция результатов статистического анализа с цифровыми платформами мониторинга технического состояния позволит создать адаптивную систему поддержки принятия решений, ориентированную на повышение надежности и эффективности функционирования карьерных экскаваторов в сложных горно-геологических условиях.

Заключение

Полученные результаты позволили перейти от теоретического анализа рисков отказов к построению практико-ориентированной модели оценки эффективности технического обслуживания

и ремонта. Применение коэффициента $K_{\text{ТоиР}}$ позволяет использовать его в качестве универсального критерия, позволяющего интегрально оценить баланс между плановыми и аварийными видами простоев и установить связь между техническим состоянием оборудования и его эксплуатационной производительностью.

Практическая значимость работы выражается в том, что сформированные на ее основе выводы и статистические зависимости могут быть использованы при разработке регламентов технического обслуживания, адаптированных под реальные условия эксплуатации, а также при внедрении элементов предиктивной аналитики в систему управления техническим состоянием парка экскаваторов.

Полученные данные закладывают основу для дальнейших исследований в области цифровизации технического обслуживания, разработки адаптивных стратегий ТОиР и внедрения концепции CM&R как системного подхода к управлению надежностью горной техники.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сафиуллин Р. Н., Кацуба Ю. Н., Унгефук А. А., Хисамутдинова Э. Л., Хохлов А. В. Бутстрэп-метод мониторинга безопасности систем управления движением высокоавтоматизированных горных машин // Горная промышленность. – 2025. – № 15. – С. 73–80. DOI: 10.30686/1609-9192-2025-15-73-80.
2. Safiullin R., Arias Z. Comprehensive assessment of the effectiveness of passenger transportation processes using intelligent technologies // The Open Transportation Journal. 2024, vol. 18, article e26671212320514. DOI: 10.2174/0126671212320514240611100437.
3. Хамидов О. У., Шибанов Д. А. Техническое обслуживание и ремонт карьерных экскаваторов по регламенту с учетом фактических условий и режимов их эксплуатации // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2025. – № 12-3. – С. 152–167. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_123_0_152.
4. Хорешок А. А., Дубинкин Д. М., Марков С. О., Тюленев М. А. Об изменении эффективности производительности экскаваторов при использовании карьерных самосвалов с различной вместимостью кузова // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2021. – № 6(148). – С. 85–93. DOI: 10.26730/1999-4125-2021-6-85-93.
5. Журавлев А. Г., Глебов И. А., Черепанов В. А. К вопросу повышения производительности и технической готовности мощных отечественных экскаваторов // Проблемы недропользования. – 2023. – № 4. – С. 76–88. DOI: 10.25635/2313-1586.2023.04.076.
6. Грабский А. А., Сергеев В. Ю., Грабская Е. П. Обоснование выбора стратегии технического обслуживания и ремонтов карьерных экскаваторов // Уголь. – 2021. – № 2. – С. 14–17. DOI: 10.18796/0041-5790-2021-2-14-17.

7. Коршунов Г. И., Мироненкова Н. А., Чижов О. В., Полещук А. А. Анализ результатов проведения поверхностной радоновой съемки на примере шахты Кузнецкого угольного бассейна // Безопасность труда в промышленности. – 2025. – № 11. – С. 81–86. DOI: 10.24000/0409-2961-2025-11-81-86.

8. Рахутин М. Г., Занг К. К., Кривенко А. Е., Чан В. Х. Оценка влияния температуры рабочей жидкости на потери мощности карьерного гидравлического экскаватора // Записки Горного института. – 2023. – Т. 261. – С. 374–383.

9. Максаров В. В., Ефимова М. В., Филипенко И. А. Выбор параметров процесса магнито-абразивного полирования для обработки кромок корпусных деталей летательных аппаратов из алюминиевых сплавов // Цветные металлы. – 2024. – № 3. – С. 78–84. DOI: 10.17580/tsm.2024.03.11.

10. Лукашук О. А., Строганов Ю. Н., Великанов В. С., Дремин А. В. Исследование влияния модернизации ковша экскаватора ЭКГ-20 на технико-эксплуатационные показатели // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2024. – № 4. – С. 284–293.

11. Комиссаров А. П., Шестаков В. С., Лукашук О. А., Хорошавин С. А. Рычажные механизмы карьерных экскаваторов // Актуальные проблемы повышения эффективности и безопасности эксплуатации горно-шахтного и нефтепромыслового оборудования. – 2019. – Т. 1. – С. 21–27.

12. Великанов В. С., Гришин И. А., Лукашук О. А., Дегодя Е. Ю., Тельминов Н. С. Исследование напряженно-деформированного состояния рабочего органа карьерного экскаватора при динамических нагрузках от грансостава пород // Уголь. 2024. – № 12. – С. 103–107. DOI: 10.18796/0041-5790-2024-12-103-107.

13. Салимов А. Э., Шибанов Д. А., Иванов С. Л. Риски отказов карьерного экскаватора, связанные с его техническим обслуживанием и ремонтом // Горная промышленность. – 2024. – № 2. – С. 97–102. DOI: 10.30686/1609-9192-2024-2-97-102.

14. Герике П. Б., Герике Б. Л., Шахманов В. Н. Выбор и обоснование критерия для диагностики несоосности валопроводов карьерных экскаваторов // Техника и технология горного дела. – 2021. – № 3 (14). – С. 50–60. DOI: 10.26730/2618-7434-2021-3-50-60.

15. Shojaee Barjoe S., Rodionov V., Rezaei N. Occupational injuries associated with safety climate among ceramic industry workers in Iran // Scientific Reports. 2025, vol. 15, article 24585. DOI: 10.1038/s41598-025-09704-6.

16. Dağsuyu S., Oturakci M. M., Kokangül A. A new approach to Fine-Kinney method and an implementation study // Alphanumeric Journal. 2015, vol. 3, no. 2, pp. 83–92. DOI: 10.17093/aj.2015.3.2.5000139953.

17. Агеева Е. В., Агеев Е. В., Виноградов Е. С. Стратегии развития технологий технического обслуживания и ремонта автомобилей. – Курск: Планета+, 2025. – 179 с.

18. Canelón R., Carrasco C., Rivera F. Design of a remote assistance model for truck maintenance in the mining industry // Journal of Quality in Maintenance Engineering. 2024, vol. 30, no. 1, pp. 175–201. DOI: 10.1108/JQME-02-2023-0024.

19. Андреева Л. И. Выбор стратегии ремонтного обслуживания горной техники // Известия высших учебных заведений // Горный журнал. – 2021. – № 4. – С. 83–91. DOI: 10.21440/0536-1028-2021-4-83-91.

20. Чуксин А. И., Иванов С. Л. Повышение надежности и безопасности машинного оборудования проведением его точного технического обслуживания (mechanical precision maintenance) / Инновации на транспорте и в машиностроении: Сборник трудов IV международной научно-практической конференции. – СПб., 2016. – С. 172–175.

21. Maksarov V. V., Kufayev V. G. Magnetic abrasive finishing of workpieces for anti-friction bronze slide bearing shells // International Journal of Engineering, Transactions A: Basics. 2026, vol. 39, no. 1, pp. 26–33. DOI: 10.5829/IJE.2026.39.01A.03.

22. Романов Р. А., Севастьянов В. В., Печеневский А. П. Современные средства и методики диагностики оборудования горнодобывающей и горноперерабатывающей отрасли согласно концепции «Надежное оборудование» // Вибрация машин: измерение, снижение, защита. – 2008. – № 2(13). – С. 24–36.

23. Назарычев А. Н., Дяченко Г. В., Сычев Ю. А. Исследование надежности тягового электропривода карьерных самосвалов на основе анализа отказов его функциональных узлов // Записки Горного института. – 2023. – Т. 261. – С. 363–373.

24. *Mikhailov A. V., Bouguebrine C.* Analysis excavator equipping with lidar sensors for functionality improving // *International Journal of Engineering*. 2025, vol. 39, no. 6, pp. 1414–1421. DOI: 10.5829/ije.2026.39.06c.10.

25. *Москвичев В. В., Ковалев М. А.* Оценка показателей эксплуатационной надежности карьерных канатных экскаваторов // *Транспортные системы и технологии*. — 2020. — Т. 6. — № 4. — С. 25–44. DOI: 10.17816/transsyst20206425-44.

26. *Алиева Л., Жуков И. А.* Повышение эффективности ударно-поворотного бурения горных пород высокой крепости совершенствованием структуры породоразрушающего безлезвийного инструмента // *Устойчивое развитие горных территорий*. — 2024. — Т. 16. — № 4. — С. 1681–1694. DOI: 10.21177/1998-4502-2024-16-4-1681-1694.

27. *Yaghini A.* Electric rope shovel operation enhancements, understanding and modelling the impact of the operator. 2021. DOI: 10.7939/r3-36bh-kf53.

28. *Данилкин А. А., Мартынов В. Ю., Андреева Л. И., Красникова Т. И.* Подходы к формированию эффективной системы ремонтного обслуживания горной техники // *Горное оборудование и электромеханика*. — 2015. — № 5(114). — С. 39–43.

29. *Великанов В. С., Мусонов О. С., Панфилова О. Р., Ильина Е. А., Дёрина Н. В.* Инструменты предиктивной аналитики в минимизации отказов горнотранспортного оборудования // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. — 2021. — Т. 19. — № 4. — С. 5–15. DOI: 10.18503/1995-2732-2021-19-4-5-15.

30. *Zvonarev I. E., Ivanov S. L.* Evaluation of losses in transmission of machinery for development of mineral deposits in conditions of variable load // *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*. 2017, vol. 87, no. 2, article 022024. DOI: 10.1088/1755-1315/87/2/022024.

31. *Florea V. A., Toderas M.* Efficiency of maintenance activities in aggregate quarries: a case study of wear parts on loaders and excavators // *Applied Sciences*. 2024, vol. 14, no. 17, article 7649. DOI: 10.3390/app14177649.

32. *Панченко Н. М.* Выбор рационального сочетания землеройной и транспортной техники при производстве земляных работ // *Тенденции развития науки и образования*. — 2022. — № 87-3. — С. 70–74. DOI: 10.18411/trnio-07-2022-98.

33. *Манаков А. Л.* Оценка состояния и моделирование организации эксплуатации и ремонта путевой техники в структуре дирекций по эксплуатации и ремонту путевых машин // *Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения*. — 2013. — № 1(49). — С. 109–117.

34. *Макаров В. Н., Анистратов К. Ю.* Достижение наивысших рекордных показателей месячной производительности экскаваторов ЭКГ-18 на разрезах ЗАО «Стройсервис» // *Уголь*. — 2019. — № 1 (1114). DOI: 10.18796/0041-5790-2019-1-20-26.

35. *Гусев В. Н., Одинцов Е. Е., Жерлыгина Е. С.* Расчет сдвижений и деформаций массива горных пород с учетом натурных данных // *Горный журнал*. — 2025. — № 4. DOI: 10.17580/gzh.2025.04.03.

36. *Гончаренко С. Н., Дементьева Е. В.* Анализ риска возникновения аварийных ситуаций на промышленных объектах горного предприятия в отечественных и зарубежных исследованиях // *Проблемы анализа риска*. — 2010. — Т. 7. — № 2. — С. 88–95.

37. *Андреева Л. И., Лапаева О. А.* К вопросу анализа риска эксплуатации горного оборудования // *Горное оборудование и электромеханика*. — 2010. — № 7. — С. 47–51. **ГИАВ**

REFERENCES

1. Safullin R. N., Katsuba Yu. N., Ungefuk A. A., Khisamutdinova E. L., Khokhlov A. V. Bootstrap method for monitoring the safety of traffic control systems of highly automated mining machines. *Russian Mining Industry Journal*. 2025, no. 15, pp. 73–80. [In Russ]. DOI: 10.30686/1609-9192-2025-15-73-80.

2. Safullin R., Arias Z. Comprehensive assessment of the effectiveness of passenger transportation processes using intelligent technologies. *The Open Transportation Journal*. 2024, vol. 18, article e26671212320514. DOI: 10.2174/0126671212320514240611100437.

3. Khamidov O. U., Shibanov D. A. Regulated maintenance and repair of quarry excavators considering real-world conditions and operating modes. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2025, no. 12-3, pp. 152–167. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_123_0_152.

4. Khoreshok A. A., Dubinkin D. M., Markov S. O., Tyulenev M. A. On changes of efficient productivity of excavators when using dump trucks with different body capacity. *Bulletin of the Kuzbass*

- State Technical University. 2021, no. 6(148), pp. 85–93. [In Russ]. DOI: 10.26730/1999-4125-2021-6-85-93.
5. Zhuravlev A. G., Glebov I. A., Cherepanov V. A. To the question of increasing productivity and technical readiness of powerful domestic excavators. *Problems of Subsoil Use*. 2023, no. 4, pp. 76–88. [In Russ]. DOI: 10.25635/2313-1586.2023.04.076.
 6. Grabsky A. A., Sergeev V. Yu., Grabskaya E. P. Justification of the choice of the strategy of maintenance and repairs of the open-pit excavators. *Ugol'*. 2021, no. 2, pp. 14–17. [In Russ]. DOI: 10.18796/0041-5790-2021-2-14-17.
 7. Korshunov G. I., Mironenkova N. A., Chizhov O. V., Poleshchuk A. A. Analysis of results of radon surface survey using the example of the Kuznetsk coal basin mine. *Occupational Safety in Industry*. 2025, no. 11, pp. 81–86. [In Russ]. DOI: 10.24000/0409-2961-2025-11-81-86.
 8. Rakhutin M. G., Zang K. K., Krivenko A. E., Chan V. H. Assessment of the impact of working fluid temperature on power losses in a mining hydraulic excavator. *Journal of Mining Institute*. 2023, vol. 261, pp. 374–383. [In Russ].
 9. Maksarov V. V., Efimova M. V., Filipenko I. A. Selection of the process parameters of magnetic abrasive polishing for edge treatment of aircraft hull parts made of aluminum alloys. *Tsvetnye Metally*. 2024, no. 3, pp. 78–84. [In Russ]. DOI: 10.17580/tsm.2024.03.11.
 10. Lukashuk O. A., Stroganov Y. N., Velikanov V. S., Dremine A. V. Investigation of the influence of modernization of the bucket of excavator EKG-20 on technical and operational performance. *News of the Tula state university. Sciences of Earth*. 2024, no. 4, pp. 284–293. [In Russ].
 11. Komissarov A. P., Shestakov V. S., Lukashuk O. A., Khoroshavin S. A. Lever mechanisms of quarry excavators. *Actual problems of improving the efficiency and safety of mining and oilfield equipment operation*. 2019, vol. 1, pp. 21–27. [In Russ].
 12. Velikanov V. S., Grishin I. A., Lukashuk O. A., Degodya E. Yu., Telminov N. S. Study of the stress-strain state of the working body of a quarry excavator under dynamic loads from the granulometric composition of rocks. *Ugol'*. 2024, no. 12, pp. 103–107. [In Russ]. DOI: 10.18796/0041-5790-2024-12-103-107.
 13. Salimov A. E., Shibanov D. A., Ivanov S. L. Failure risks of mine excavator associated with its maintenance and repair. *Russian Mining Industry Journal*. 2024, no. 2, pp. 97–102. [In Russ]. DOI: 10.30686/1609-9192-2024-2-97-102.
 14. Gericke P. B., Gericke B. L., Shakhmanov V. N. Selection and justification of the criterion for diagnostics of misalignment of shafting shafts of quarry excavators. *Technics and technology of mining*. 2021, no. 3 (14), pp. 50–60. [In Russ]. DOI: 10.26730/2618-7434-2021-3-50-60.
 15. Shojaee Barjooee S., Rodionov V., Rezaei N. Occupational injuries associated with safety climate among ceramic industry workers in Iran. *Scientific Reports*. 2025, vol. 15, article 24585. DOI: 10.1038/s41598-025-09704-6.
 16. Dağsuyu C., Oturakci M. M., Kokangül A. A new approach to Fine-Kinney method and an implementation study. *Alphanumeric Journal*. 2015, vol. 3, no. 2, pp. 83–92. DOI: 10.17093/aj.2015.3.2.5000139953.
 17. Ageeva E. V., Ageev E. V., Vinogradov E. S. *Strategii razvitiya tekhnologiy tekhnicheskogo obsluzhivaniya i remonta avtomobiley* [Strategies of development of technologies for maintenance and repair of automobiles], Kursk, 2025, 179 p.
 18. Canelón R., Carrasco C., Rivera F. Design of a remote assistance model for truck maintenance in the mining industry. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*. 2024, vol. 30, no. 1, pp. 175–201. DOI: 10.1108/JQME-02-2023-0024.
 19. Andreeva L. I. Choice of strategy of repair maintenance of mining equipment. *Minerals and Mining Engineering*. 2021, no. 4, pp. 83–91. [In Russ]. DOI: 10.21440/0536-1028-2021-4-83-91.
 20. Chuksin A. I., Ivanov S. L. Improving the reliability and safety of machinery through precision maintenance (mechanical precision maintenance). *Innovatsii na transporte i v mashinostroenii: Sbornik trudov IV mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Innovations in transport and mechanical engineering. Collection of papers from the IV International Scientific and Practical Conference], Saint-Petersburg, 2016, pp. 172–175. [In Russ].
 21. Maksarov V. V., KufaeV. G. Magnetic abrasive finishing of workpieces for anti-friction bronze slide bearing shells. *International Journal of Engineering, Transactions A: Basics*. 2026, vol. 39, no. 1, pp. 26–33. DOI: 10.5829/IJE.2026.39.01A.03.

22. Romanov R. A., Sevastyanov V. V., Pechenevskiy A. P. Modern means and methods of diagnostics of the equipment of mining and mining processing industry according to the concept «Reliable equipment». *Vibratsiya mashin: izmerenie, snizhenie, zashchita*. 2008, no. 2(13), pp. 24–36. [In Russ].
23. Nazarychev A. N., Dyachenok G. V., Sychev Yu. A. Investigation of the reliability of the traction electric drive of mine dump trucks on the basis of failure analysis of its functional units. *Journal of Mining Institute*. 2023, vol. 261, pp. 363–373. [In Russ].
24. Mikhailov A. V., Bouguebrine C. Analysis excavator equipping with lidar sensors for functionality improving. *International Journal of Engineering*. 2025, vol. 39, no. 6, pp. 1414–1421. DOI: 10.5829/ije.2026.39.06c.10.
25. Moskvichev V. V., Kovalev M. A. Evaluation of the operational reliability indicators of the quarry rope excavators. *Transport systems and technologies*. 2020, vol. 6, no. 4, pp. 25–44. [In Russ]. DOI: 10.17816/transsyst20206425-44.
26. Aliyeva L., Zhukov I. A. Improving the efficiency of percussion-rotary drilling of high-strength rocks by improving the structure of blade-free rock-breaking tools. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2024, vol. 16, no. 4, pp. 1681–1694. [In Russ]. DOI: 10.21177/1998-4502-2024-16-4-1681-1694.
27. Yaghini A. *Electric rope shovel operation enhancements, understanding and modelling the impact of the operator*. 2021. DOI: 10.7939/r3-36bh-kf53.
28. Danilkin A. A., Martynov V. Yu., Andreeva L. I., Krasnikova T. I. Approaches to the formation of an effective system of repair maintenance of mining equipment. *Mining equipment and electromechanics*. 2015, no. 5(114), pp. 39–43. [In Russ].
29. Velikanov V. S., Musonov O. S., Panfilova O. R., Ilyina E. A., Diorina N. V. Predictive analytics tools in minimizing failures of mining transportation equipment. *Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University*. 2021, vol. 19, no. 4, pp. 5–15. [In Russ]. DOI: 10.18503/1995-2732-2021-19-4-5-15.
30. Zvonarev I. E., Ivanov S. L. Evaluation of losses in transmission of machinery for development of mineral deposits in conditions of variable load. *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*. 2017, vol. 87, no. 2, article 022024. DOI: 10.1088/1755-1315/87/2/022024.
31. Florea V. A., Toderas M. Efficiency of maintenance activities in aggregate quarries: a case study of wear parts on loaders and excavators. *Applied Sciences*. 2024, vol. 14, no. 17, article 7649. DOI: 10.3390/app14177649.
32. Panchenko N. M. Choice of rational combination of earthmoving and transportation equipment in the production of earth works. *Trends in Science and Education*. 2022, no. 87-3, pp. 70–74. [In Russ]. DOI: 10.18411/trnio-07-2022-98.
33. Manakov A. L. Assessment of the state and modelling of the organisation of operation and repair of track equipment within the structure of directorates for the operation and repair of track machines. *Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobsheniâ*. 2013, no. 1(49), pp. 109–117. [In Russ].
34. Makarov V. N., Anistratov K. Yu. Achieving the highest record monthly productivity rates for EKG-18 excavators at the open-pit mines of Stroy Service CJSC. *Ugol'*. 2019, no. 1 (1114). [In Russ]. DOI: 10.18796/0041-5790-2019-1-20-26.
35. Gusev V. N., Odintsov E. E., Zherlygina E. S. Calculation of shifts and deformations of the rock mass considering field data. *Gornyi Zhurnal*. 2025, no. 4. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2025.04.03.
36. Goncharenko S. N., Dementieva E. V. Analysis of the risk of emergencies at industrial facilities of mining enterprises in domestic and foreign studies. *Problems of risk analysis*. 2010, vol. 7, no. 2, pp. 88–95. [In Russ].
37. Andreeva L. I., Lapaeva O. A. On the issue of analysing the risk of mining equipment operation. *Mining Equipment and Electromechanics*. 2010, no. 7, pp. 47–51. [In Russ].

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Салимов Аббос Эркин угли¹ – аспирант,
РИНЦ Author ID: 1282219, SPIN-код: 7110-2744,
Scopus Author ID: 59198498200,
e-mail: salimoff.abbas@gmail.com,

Иванов Сергей Леонидович¹ — д-р техн. наук, профессор,
РИНЦ Author ID: 615961, SPIN-код: 4430-7239,
Scopus Author ID: 56673503800, WoS Researcher ID: T-4762-2019,
ORCID ID: 0000-0002-7014-2464, e-mail: Ivanov_SL@pers.spmi.ru,
¹ Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II.
Для контактов: Салимов А.Э., e-mail: salimoff.abbas@gmail.com.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

A.E. Salimov¹, Graduate Student, RINC Author ID: 1282219,
SPIN-code: 7110-2744, Scopus Author ID: 59198498200,
e-mail: salimoff.abbas@gmail.com,
S.L. Ivanov¹, Dr. Sci. (Eng.), Professor, RINC Author ID: 615961,
SPIN-code: 4430-7239, Scopus Author ID: 56673503800,
WoS Researcher ID: T-4762-2019, ORCID ID: 0000-0002-7014-2464,
e-mail: Ivanov_SL@pers.spmi.ru,

¹ Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, 199106, Saint-Petersburg, Russia.

Corresponding author: A.E. Salimov, e-mail: salimoff.abbas@gmail.com

Получена редакцией 09.12.2025; получена после рецензии 10.03.2026; принята к печати 10.04.2026.
Received by the editors 09.12.2025; received after the review 10.03.2026; accepted for printing 10.04.2026.



ОТДЕЛЬНЫЕ СТАТЬИ ГОРНОГО ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКОГО БЮЛЛЕТЕНЯ (СПЕЦИАЛЬНЫЙ ВЫПУСК)

РАЗРАБОТКА КОНЦЕПЦИИ, МЕХАНИЗМА И ПРИНЦИПОВ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ГОРНОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ НА БАЗЕ СОЧЕТАНИЯ ОТКРЫТОЙ И СКВАЖИННОЙ ГИДРАВЛИЧЕСКОЙ ГЕОТЕХНОЛОГИИ (2025, № 11, СБ 28, 20 с.)

Мельник Владимир Васильевич — д-р техн. наук, профессор, НИТУ МИСИС, e-mail: geotech-melnic@yandex.ru, ORCID ID: 0009-0008-8678-8324,

Каппушев Динислам Замирович — заместитель директора центра патриотического и культурно-нравственного воспитания НИТУ МИСИС, e-mail: kappushev@misis.ru.

Приведен анализ отечественного и зарубежного опыта применения, при освоении рудных и угольных месторождений, горнотехнических систем на базе сочетания открытой и подземной геотехнологии. Разработаны концепция, механизм и принципы проектирования горнотехнических систем на базе сочетания открытой и скважинной гидравлической геотехнологии для конкретных условий функционирования. В качестве базовых вариантов сочетания с открытой геотехнологией рекомендуется скважинная гидравлическая геотехнология с различными исполнительными органами, схемами и режимами разрушения угольного пласта. Разработана методика по определению производительности скважинных гидромониторных агрегатов с повышенной разрушающей способностью.

Ключевые слова: проектирование, горнотехническая система, комбинированная геотехнология, концепция, механизм, принципы, скважинная гидравлическая геотехнология.

DEVELOPMENT OF THE CONCEPT, MECHANISM AND PRINCIPLES OF MINING ENGINEERING SYSTEMS DESIGN BASED ON A COMBINATION OF OPEN-PIT AND BOREHOLE HYDRAULIC GEOTECHNOLOGY

V.V. Melnik¹, Dr. Sci. (Eng.), Professor, e-mail: geotech-melnic@yandex.ru, ORCID ID: 0009-0008-8678-8324,
D.Z. Kappushev¹, Deputy Director of the Center for Patriotic, Cultural and Moral Education, e-mail: kappushev@misis.ru,
¹ MUST MISIS, 119049, Moscow, Russia.

The analysis of domestic and foreign experience in the application of mining systems based on a combination of open and underground geotechnology in the development of ore and coal deposits is presented. The concept, mechanism and principles of designing mining engineering systems based on a combination of open-pit and borehole hydraulic geotechnology for specific operating conditions have been developed. Borehole hydraulic geotechnology with various executive bodies, schemes and modes of coal seam fracture is recommended as basic options for combining with open geotechnology. A technique has been developed to determine the productivity of borehole hydraulic monitoring units with increased destructive power.

Key words: engineering, mining engineering system, combined geotechnology, concept, mechanism, principles, borehole hydraulic geotechnology.