ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень /
MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2023;(11-1):144-158
ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL PAPER

УДК 622.271.4; 621.879.3 DOI: 10.25018/0236_1493_2023_111_0_144

# ЭФФЕКТИВНОСТЬ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ КАРЬЕРНОГО ЭКСКАВАТОРА, КАК ЭРГАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

**Д.А. Шибанов[1], С.Л. Иванов[1], Е.И. Шешукова[1], Е.С. Недашковская[1]**

[1] Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия, e-mail: shibanov_da@pers.spmi.ru

***Аннотация:*** Рассмотрена проблема эффективности функционирования экскаваторов с большой единичной мощностью как эргатической системы в связи с увеличением числа таких машин в технологических парках предприятий. С целью минимизации всех возможных отклонений от базовых условий эксплуатации экскаватора проведены натурные наблюдения за экскаватором ЭКГ-20КМ на одном из железорудных карьеров России в период его гарантийного сервисного сопровождения со сменными бригадами. Выявлены различия в управлении экскаватором машинистами одной бригады и их влияние на вероятность возникновения отказов оборудования. Был проведен анализ неплановых отказов оборудования с разбивкой по каждой смене. При переходе машинистов экскаваторов к управлению машиной большей единичной мощности, отмечается адаптационный период порядка одного года эксплуатации, в этот период характерны более нагруженные режимы работы и повышенный поток отказов элементов рабочего оборудования. Для выявления закономерностей влияния квалификации машиниста было проведено моделирование процесса функционирования карьерного экскаватора при погрузке горной массы в автосамосвал грузоподъемностью 220 т. Раскрыты закономерности изменения динамических процессов нагрузки экскаватора в процессе набора горной массы машинистами разной квалификации. Выявлены зоны изменения динамической составляющей нагрузки при экскавации горной массы, предельно отличающиеся в зависимости от квалификации машиниста.

***Ключевые слова:*** карьерный экскаватор, процесс копания, наполнение ковша, квалификация машиниста, режимы работы, динамические процессы, расходование ресурса, влияние машиниста, нагрузки привода, эргатическая система.

***Для цитирования:*** *Шибанов Д. А., Иванов С. Л., Шешукова Е. И., Недашковская Е. С.* Эффективность функционирования карьерного экскаватора, как эргатической системы // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2023. – № 11-1. – С. 144–158. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_111_0_144.

## Efficiency of operation of a quarry excavator as an ergatic system

**D.A. Shibanov[1], S.L. Ivanov[1], E.I. Sheshukova[1], E.S. Nedashkovskaya[1]**

[1] Empress Catherine II Saint-Petersburg Mining University, Saint-Petersburg, Russia, e-mail: shibanov_da@pers.spmi.ru

© Д.А. Шибанов, С.Л. Иванов, Е.И. Шешукова, Е.С. Недашковская. 2023.

***Abstract:*** The paper considers the problem of efficiency of functioning of excavators with a large unit capacity as an ergatic system due to the increasing number of such machines in the technological fleets of enterprises. In order to minimize all possible deviations from the basic conditions of the excavator operation, field observations of the excavator EKG-20KM at one of the iron ore quarries in Russia during its warranty service support with shift crews were carried out. Differences in the excavator control by drivers of one crew and their influence on the probability of equipment failures were revealed. Unplanned equipment failures were analyzed with a breakdown for each shift. At transition of excavator drivers to control the machine of greater unit capacity, it is noted about adaptation period equal to the order of one year of operation, which is characterized by more loaded modes of operation and increased flow of failures of elements of working equipment. For revealing of regularities of influence of qualification of the driver the modeling of process of functioning of the quarry excavator at loading of a rock mass in a dump truck with carrying capacity of 220 tons has been carried out. Regularities of change of dynamic processes of excavator loading in the process of rock mass recruitment by drivers of different qualification are revealed. The zones of change of dynamic component of load during excavation of rock mass and extremely different depending on the qualification of the operator are revealed.

***Key words:*** electric shovel, rock digging process, excavator bucket filling, operator qualification, operating modes, dynamic processes, resource consumption, operator influence on excavator reliability, drive loads during excavation, ergatic system.

***For citation:*** Shibanov D. A., Ivanov S. L., Sheshukova E. I., Nedashkovskaya E. S. Efficiency of operation of a quarry excavator as an ergatic system. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023; (11-1):144-158. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_111_0_144.

## Введение

Карьерные экскаваторы, являясь сложной горной машиной, требуют управления высококвалифицированным персоналом, который сможет обеспечить безопасную и эффективную работу оборудования. Для достижения целей устойчивого развития в горной отрасли необходимо, чтобы инженеры и основной технологический персонал обладали профессиональными компетенциями, позволяющими эффективно использовать ресурсы и минимизировать негативное воздействие на окружающую среду [1 — 3].

Оценка надежности экскаваторов также является важным аспектом, поскольку любая поломка может привести к значительным издержкам производства и высоким затратам на их устранение.

С 2010 г. наблюдается рост единичной мощности карьерных экскаваторов на горнодобывающих предприятиях РФ и стран ближнего зарубежья [4]. Данная тенденция объясняется появлением у российских производителей (ИЗ-КАРТЭКС и УЗТМ) моделей с объемом ковша более 20 м$^3$ [5]. Доля вводимых в эксплуатацию новых экскаваторов с ковшами от 20 м$^3$ в 2011 — 2012 гг. возросла до 32% от общего количества поставляемых на горнодобывающие предприятия новых карьерных экскаваторов. По состоянию на декабрь 2022 г. доля экскаваторов с ковшами более 20 м$^3$ составила 83% (см. табл. 1). При этом, если до 2010 г. присутствовали экскаваторы импортного производства, в 2023 г. все новые экскаваторы, поставляемые для

Таблица 1

***Динамика ввода в эксплуатацию карьерных канатных экскаваторов на предприятиях РФ и ближнего зарубежья***
***Dynamics of commissioning of Rope Shovels at the enterprises of the Russian Federation and neighboring countries***

| Класс экскаватора | Количество, шт. | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 2006–2007 | 2008–2009 | 2010–2011 | 2012–2013 | 2014–2015 | 2016–2017 | 2018–2019 | 2020–2021 | 2022 |
| до 15 м$^3$ | 53 | 58 | 49 | 49 | 23 | 31 | 43 | 13 | 4 |
| от 20 м$^3$ | 3 | 3 | 10 | 23 | 15 | 26 | 23 | 32 | 20 |

эксплуатации на предприятиях России и стран ближнего зарубежья, произведены группой УЗТМ-КАРТЭКС [6, 7]. Производство карьерных экскаваторов российскими компаниями, имеет современные производственные мощности и передовые технологии изготовления, отвечает всем современным требованиям по качеству изготавливаемых узлов и деталей [8, 9], что гарантирует покрытие потребности горнодобывающих предприятий в выемочно-погрузочном оборудовании.

Существующие подходы к эксплуатации, техническому обслуживанию и ремонту, а также оценка эффективности эксплуатации экскаваторов нового поколения, требуют своего решения при реализации цели системы [10—12].

Увеличение в технологических парках предприятий экскаваторов с большой единичной мощностью накладывает на машинистов экскаваторов определенные требования к их квалификации. При условии, что порядок работы на экскаваторах разной единичной мощности (например, ЭКГ-10 и ЭКГ-20К), а также расположение органов управления индикации и контроля практически идентичны, машинистам экскаваторов, даже

Таблица 2

***Технические характеристики экскаваторов***
***Technical characteristics of excavators***

| Наименование параметра | Модель экскаватора | |
|---|---|---|
| | ЭКГ-10; ЭКГ-12К | ЭКГ-20 (модификации 20КМ, 20К) |
| Полезная нагрузка в ковше, т | 20; 24 | 40; 50 |
| Вместимость ковша, м$^3$ | 10; 12 | 20; 25 |
| Высота копания, м | 13,5; 15 | 16; 16,5 |
| Радиус копания, м | 18,4; 18,6 | 21,7; 22 |
| Рабочая масса, т | 410; 410 | 710; 730 |
| Мощность привода подъема, кВт | 540;700 | 1120; 1200 |
| Мощность привода напора, кВт | 200; 200 | 220; 325 |
| Мощность привода поворота, кВт | 310; 400 | 700; 650 |
| Мощность привода хода, кВт | 180; 180 | 400; 650 |
| Усилие подъемное на подвеске ковша наибольшее, кН | 981; 1177 | 1668; 1865 |
| Усилие напорное наибольшее, кН | 490; 490 | 736; 834 |

при условии их высокой квалификации (8 разряд и более 5 лет опыта на машинах с объемом ковша 10 м$^3$) требуется переобучение и адаптация к более мощной машине, адаптация к реакции приводов на управляющие воздействия машиниста [13]. Для сравнения приведены технические характеристики массогабаритных параметров экскаваторов в классах 10 — 12 м$^3$ и 20 — 25 м$^3$ производства ООО «ИЗ-КАРТЭКС имени П.Г. Коробкова» (табл. 2).

**Методы**

В практике горнодобывающих предприятий квалификация машинистов экскаватора оценивается на основе единого тарифно-квалификационного справочника работ и профессий рабочих по соответствующим квалификационным разрядам. Так, согласно данному справочнику, если машинист имеет опыт работы на экскаваторе с объемом ковша от 10 м$^3$, то такому машинисту присваивается 8 разряд — наивысший из возможных. Таким образом, объективно оценить качество управления экскаватором на основе квалификационного разряда 4 машинистов одной бригады не представляется возможным. Каждый машинист будет иметь свой стиль по набору горной массы ковшом при черпании, скорость реакции на изменяющиеся условия забоя, по-разному будет «чувствовать машину». Что повлияет на рационально и адекватно подобранные скоростные и силовые параметры работы экскаваторного привода при копании. Вместе с тем различия в управлении экскаватором машинистами будут различно влиять на интенсивность расходования заложенного в конструкцию экскаватора ресурса [14].

Дополнительно к квалификационному разряду, контролю остаточного уровня теоретических знаний и принципов управления экскаватором оценку уровня машиниста проводят по критерию безаварийности.

Так, в идеализированных условиях безаварийность машиниста высокой квалификации в относительных единицах стремится к 1. В реальных условиях эксплуатации коэффициент безаварийности будет пропорционально снижаться, в зависимости от качества управления экскаватором (фактор-машинист) и качества системы технического обслуживания и ремонта (ТО и Р) как основного инструмента управления работоспособностью машины.

Отмечается, что вне зависимости от влияния качества проводимого ТО и Р, а также организации проведения работ, в функции оценки влияния машиниста на эксплуатацию экскаватора будет иметь место систематическая погрешность, общая для данных условий эксплуатации [15, 16].

**Результаты**

Чтобы оценить влияние квалификации машиниста на эффективность функционирования экскаватора с достаточной степенью достоверности, необходимо исключить иные факторы эксплуатации [17], отличающиеся от условий, в которых проводятся экспериментальные наблюдения. Так, сравнивать влияние квалификации машинистов, работающих на одной модели экскаватора, но в разных горно-геологических условиях (разные горнодобывающие предприятия) не объективно.

С целью минимизации всех возможных отклонений от базовых условий эксплуатации экскаватора, кроме квалификации машиниста, проведены натурные наблюдения за экскаватором ЭКГ-20 на одном из железорудных карьеров России в период его сервисного сопровождения.

В первый год эксплуатации были зафиксированы систематические случаи

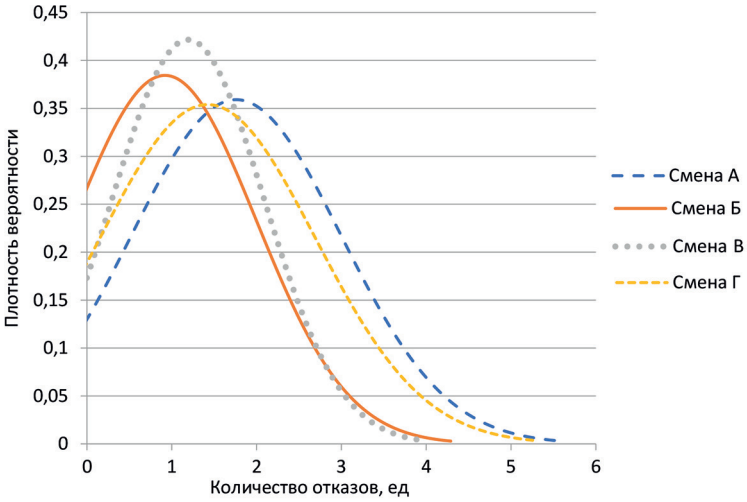


*Рис. 1. Плотность распределения вероятности возникновения отказа (количество отказов в неделю) по сменам в бригаде машинистов экскаваторов*

*Fig. 1. Distribution density of probability of failure (number of failures per week) by shift in the excavator operators' team*

преждевременного выхода из строя подъемных, напорных/возвратных канатов. По опыту эксплуатации экскаваторов модели ЭКГ-10 на данном карьере, а также иных железорудных карьерах России, наработка подъемных канатов по времени статистически оценивается равной 4 месяцам эксплуатации, аналогичная наработка и у напорных/возвратных канатов. Логично, что при эксплуатации экскаватора большей единичной мощности, в данном случае ЭКГ-20, в тех же условиях наработка канатов по времени должна быть не меньше статистической ЭКГ-10. Однако фактически наработка канатов наблюдаемого экскаватора составила в среднем 1,5 — 2,0 месяца. Важно отметить, что фактическая наработка канатов ЭКГ-20 имела тенденцию к увеличению, и через 10 — 12 месяцев эксплуатации достигла целевых показателей 4 — 5 месяцев. Приведенный факт характеризует особенности адаптации машинистов экскаваторов к условиям и режимам работы на более мощной машине.

На протяжении шести месяцев эксплуатации собирались статистические данные о работе оборудования и проводились хронометражные наблюдения. В рамках проведенного исследования выявлено характерное наличие влияния качества управления экскаватором на поток отказов его узлов и агрегатов. При наблюдении за машиной ЭКГ-20, на которой работала бригада машинистов четырьмя сменами А, Б, В и Г (состав смены — машинист и помощник машиниста), был проведен анализ неплановых отказов оборудования с разбивкой по каждой смене персонально. В результате выявлено, что в определенные смены вероятность возникновения отказов выше, чем в иные. Плотность распределения отказов по сменам машинистов экскаватора приведена на рис. 1.

По плотности распределения отказов, приходящихся на отдельные смены «машинист — помощник машиниста» «Б» и «В», наблюдается наименьшая частота отказов, следовательно, эти смены оцениваются как лучшие. Смена «В» имеет наименьшую дисперсию распределения, что характеризует ее как наиболее прогнозируемую, т.е. машинист в

различных возникающих ситуациях показывает однородные ответные реакции управления машиной. Также смену «В» можно охарактеризовать как имеющую наибольший потенциал к повышению уровня квалификации. У смены «Г» наблюдается наибольшая вероятность ошибочного управленческого ответа на изменение условий эксплуатации.

Для выявления закономерностей влияния квалификации на базе тренажерного комплекса машиниста карьерного экскаватора было проведено моделирование процесса функционирования ЭКГ-18Р при экскавации и погрузке в автосамосвал грузоподъемностью 220 т на основе данных мгновенных значений нагрузки главных приводов, получаемых с информационно-диагностической системы (ИДС) [3, 18, 19].

Высокая степень схождения работы ИДС тренажерного комплекса с показаниями реальной машины описана в работах [20 — 22].

Сравнение приемов в управлении карьерным экскаватором машиниста высокой квалификации с машинистом более низкой квалификации показывает, что машинисты с высокой квалификацией используют более эффективные и точные приемы управления приводами [23]. Они точнее подбирают степень внедрения ковша в забой, скорости набора горной массы и направления движения (согласование работы механизма подъема и напора ковша) при сохранении высо-

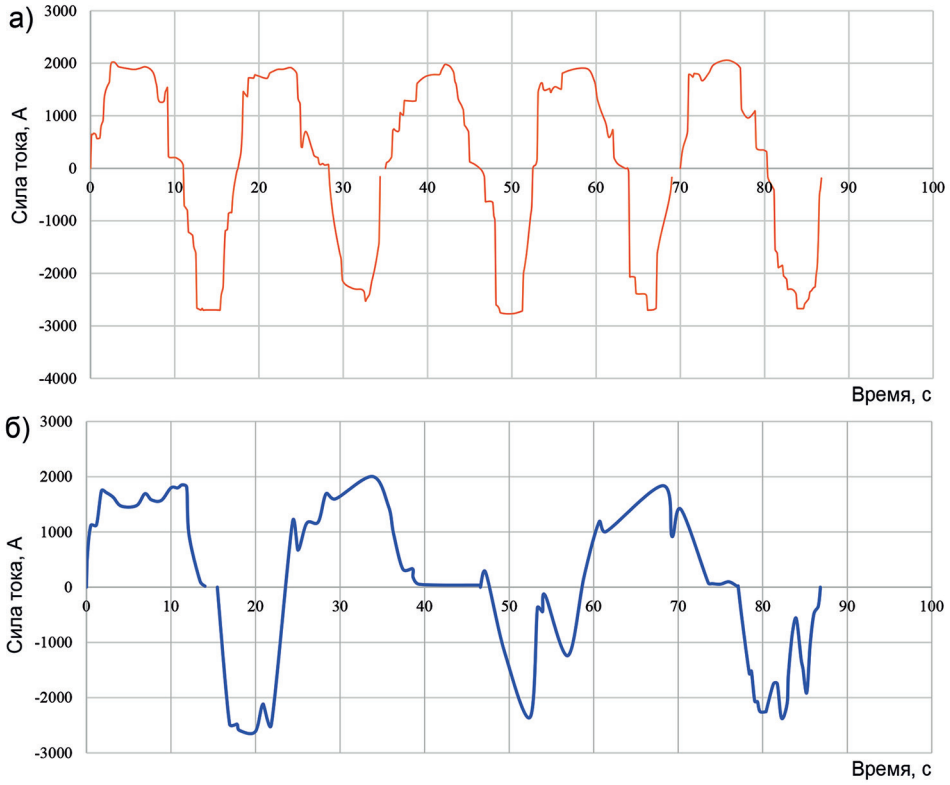


*Рис. 2. Осциллограмма мгновенных значений нагрузки привода подъема экскаватора: машинист-инструктор (а); помощник машиниста (б)*

*Fig. 2. Oscillogram of instantaneous load values of the excavator lift drive: machine-instructor (a); assistant machine operator (b)*

кой производительности, тем самым обеспечивая плавность управления движением рабочего оборудования экскаватора [24].

На рис. 2 приведены две осциллограммы работы привода подъема экскаватора ЭКГ-18Р при управлении: машинистом экскаватора высокой квалификации (рис. 2, *а*); помощником машиниста с опытом работы менее 0,6 месяцев (рис. 2, *б*).

Для проведения экспериментального исследования был выбран машинист 8 разряда с опытом работы более 10 лет, также имеющий опыт работы машинистом-инструктором. Машинист-инструктор аккредитован заводом-изготовителем, что обеспечивает приоритет соблюдения им всех установленных регламентов правильной эксплуатации для эффективного функционирования оборудования по критериям производительности, надежности и себестоимости экскавации горной массы.

Полную погрузку самосвала грузоподъемностью 220 т машинист-инструктор завершил за 87 с, среднее время цикла при этом составило 17,4 с. За тот же интервал времени помощник машиниста совершил 3 цикла экскавации средней продолжительностью 29 с. Среднее заполнение коша при экскавации машинистом-инструктором составила 100%, помощника — 87%. Вышесказанное характеризует эффективность работы по критерию производительности машины, основным параметром при этом выступает четвертая координата по проф. В.И. Баловневу [25].

Для оценки интенсивности расходования ресурса необходимо учитывать динамику нагрузок экскаваторного привода [11, 26], что пропорционально будет соответствовать динамическим нагрузкам основных несущих металлоконструкций экскаватора в целом и его рабочего оборудования в частности. Чем выше будет динамическая составляющая процесса экскавации, тем интенсивнее расход заложенного в конструкцию машины ресурса [27, 28].

Для сокращения времени цикла экскавации и снижения динамических нагрузок машинист совершает до 20 — 25 перемещений органа управления за цикл, что в среднем соответствует 1,5 — 2,5 переключениям в 1 с. В наиболее сложных условиях эксплуатации количество переключений органа управления может достигать 7 — 10 единиц в 1 с, аналогичная работа характерна для машиниста с недостаточной квалификацией [29]. Мастерство управления машиниста — это не только правильная последовательность действий при управлении техникой, но в большей степени способность быстро и точно обрабатывать информацию, адекватно реагировать на изменения внешней среды и влияющих факторов, а также принимать правильные решения.

Одним из ключевых факторов, влияющих на мастерство машиниста, является продолжительность приема и переработки информации. Чем быстрее и точнее машинист может обрабатывать поступающую и при этом постоянно изменяющуюся информацию, тем более эффективно он управляет техникой [30]. Машинист должен быстро и точно реагировать на любые изменения внешней среды для удержания нагрузки при копании в номинальных режимах, минимизации аварийных ситуаций и обеспечения безопасности [25].

Сравнение динамических процессов нагрузки экскаватора при наборе горной массы под управлением машинистом-инструктором и помощником машиниста проведено с использованием алгоритмов спектрального анализа.

Наиболее характерные различия в приемах управления процессом копания наблюдаются на стадии зачерпывания горной массы [31]. В рамках единичного

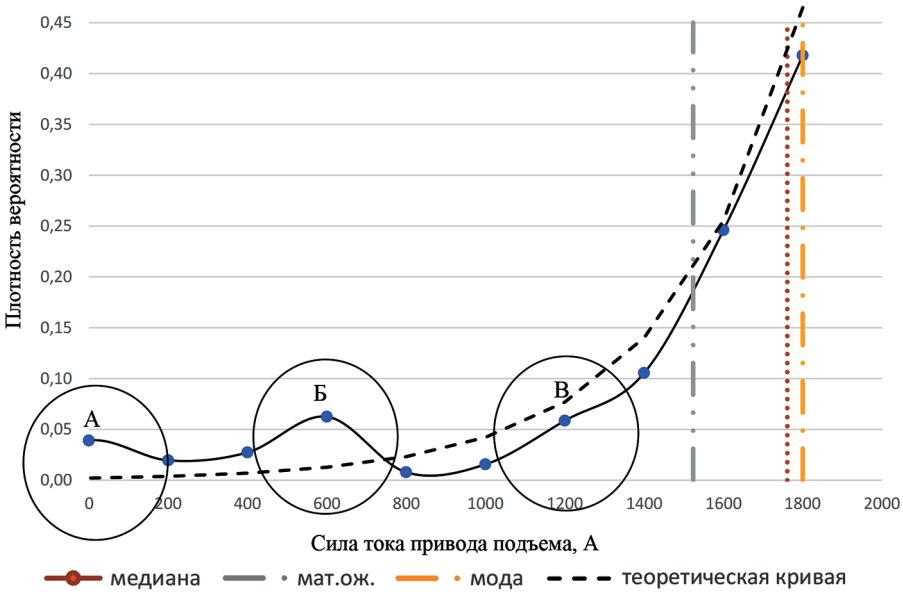


*Рис. 3. Плотность распределения мгновенных значений нагрузки привода подъема при управлении машинистом-инструктором*

*Fig. 3. Distribution density of instantaneous load values of the hoist drive when controlled by driving instructor*

цикла экскавации, стадия набора горной массы составляет порядка 5 с, при этом в данный промежуток экскаватор испытывает все основные динамические нагрузки. Плотность распределения вероятности мгновенного значения нагрузки привода подъема в процессе набора горной массы при управлении машинистом-инструктором представлена на рис. 3, помощника машиниста — на рис. 4.

Набор горной массы ковшом электрического канатного экскаватора начинается с подошвы забоя. Машинист экскаватора управляет процессом движения ковша по забою, сочетая работу приводов подъема и напора. Глубина внедрения ковша в осыпь горной массы обеспечивается приводом напора с последующим перемещением ковша по забойной траектории на всю высоту уступа приводом подъема. При этом основная работа совершается приводом подъема, напор необходим только для обеспечения компенсации реакции отжима ковша при копании.

Существует прямая зависимость между глубиной внедрения ковша в породу, усилием напора и расстоянием, которое ковш в процессе наполнения преодолевает по траектории копания. Глубина внедрения ковша в забой прямо пропорциональна скорости заполнения ковша при условии, что усилие подъема достаточно для продвижения ковша через толщу осыпи горной массы.

Во время набора горной массы, учитывая горно-геологические и технологические особенности горной массы, машинист экскаватора задает кинетостатические величины скоростных и силовых параметров процесса копания для соблюдения условия заполнения ковша к верхней точке забоя [32].

При управлении экскаватором машиниста-инструктора (рис. 3) в начале набора горной массы (зона А) происходит подбор глубины внедрения ковша в забой, что сопровождается незначительным возрастанием динамической состав-

*Рис. 4. Плотность распределения мгновенных значений нагрузки привода подъема при управлении помощником машиниста*

*Fig. 4. Distribution density of instantaneous load values of the hoist drive when controlled by the assistant driver*

ляющей нагрузки, пропорциональной силе тока привода подъема. Следует отметить, что начало процесса копания происходит не с нулевой точки, то есть машинист не останавливает движение рабочего оборудования между циклами экскавации, таким образом, отсутствуют непроизводительные интервалы времени в процессе экскавации.

Следующий экстремум на графике плотности распределения (рис. 3, зона Б) характеризуется действиями машиниста по корректировке глубины внедрения и скорости копания. Так, машинист, основываясь на своем опыте и учитывая реальные параметры забоя, осуществляет процесс заполнения ковша, тем самым подводя его к базовой величине эффективного цикла.

В зоне В наблюдается еле заметная коррекция процесса копания. Для данной области характерны действия машиниста с так называемой «точной настройкой» режимных параметров этого процесса.

По характеру плотности распределения мгновенных значений нагрузки привода подъема при управлении машинистом-инструктором отмечается, что в начале процесса копания машинист работает с увеличенной частотно-динамической составляющей нагрузки на зубьях ковша экскаватора, при этом амплитуда этих воздействий невелика в сравнении со статистической составляющей нагрузки. После основной корректировки скорости копания и глубины внедрения ковша в забой (зона Б) процесс стабилизируется, и далее происходит плавный и равномерный набор горной массы ковшом на всей высоте забоя.

Машинисты низкой квалификацией используют менее эффективные приемы в процессе копания. Существует высокая вероятность нерационального подбора глубины внедрения ковша в забой и скорости подъема, что приводит к недостаточному наполнению ковша на траектории копания к вершине забоя, либо к значительным нагрузкам, превышающим

стопорные по техническим характеристикам машины. При возникновении любого варианта машинисту будет необходимо оперативно предпринимать действия по корректировке глубины внедрения и скорости копания.

По анализу работы помощника машиниста (рис. 4) характерные области (зона А, Б и В) сохраняются, но характер их проявления несколько иной. Процесс набора горной массы начинается из нулевой точки, что говорит о полной остановке движения рабочего оборудования между циклами экскавации, а именно об увеличенном времени позиционирования ковша в исходном положении для исключения задевания его о гусеничный ход и об увеличенном времени на выбор начальной точки траектории копания.

Внедрение ковша в забой происходит не в начальной точке траектории копании (зона А) и с увеличенной в 2,08 раза интенсивностью управляющих воздействий, что в конечном итоге повышает динамическую составляющую нагрузки в сравнении с работой машиниста-инструктора. Это свидетельствует о рассинхронизации действий в управлении приводами подъема и напора ввиду нехватки опыта и навыков.

Корректировка глубины внедрения и скорости копания (зона Б), как реакция на изначально выбранные режимы процесса копания и реальные параметры забоя, при управлении помощником машиниста имеет явно выраженную повышенную динамику, при этом частотная составляющая в 3,0 раза больше, чем у машиниста-инструктора, и в 4,5 раза больше в сравнении со статистической составляющей нагрузки при номинальных режимах.

Зона Б (4), соответствующая «точной» корректировке при управлении машинистом-инструктором, при работе помощника машиниста не согласуется с понятием «точная». Для процесса копания под управлением помощника машиниста характерен повторный период корректировки режимных параметров экскавации. При этом стабилизация процесса набора горной массы не наблюдается, управляющие действия машиниста имеют хаотичный характер, частотная составляющая нагрузки в 2,37 раз больше аналогичного периода при управлении машинистом-инструктором.

Таким образом, выбор машинистом нерационального режима копания приводит к увеличению частотно-динамической составляющей нагрузки приводов экскаватора и его элементов, увеличению времени цикла экскавации. При таких режимах эксплуатации резко возрастает интенсивность расходования ресурса машины и ее элементов, увеличивается интенсивность накопления повреждений, а также идет интенсификация процесса деградации металлоконструкций машины и ее узлов и агрегатов.

**Заключение**

Раскрыты отдельные закономерности при сравнении динамических процессов нагрузки экскаватора в процессе набора горной массы машинистами разной квалификации. По характеру плотности распределения мгновенных значений нагрузки привода подъема отмечаются явно выраженные зоны и предельно отличающиеся в зависимости от квалификации машиниста: зона, соответствующая начальному внедрению ковша в забой, зона корректировки режимных параметров процесса копания и зона «точной настройки». Динамические составляющие нагрузки в отдельные периоды цикла экскавации при управлении экскаватором машинистом низкой квалификации возрастают до 4,5 раз в сравнении с управлением машинистом-инструктором. При управлении экскаватором машинистом-инструктором после коррек-

тировки режимных параметров наблюдается стабилизация процесса набора горной массы. В то же время управление помощником машиниста (имеющим низкую квалификацию) на всей траектории набора горной массы осуществляется со значительными динамическими нагрузками, при этом стабилизации процесса не наблюдается.

Выявленные тенденции позволяют лучше понять процессы управления экскаватором при наборе горной массы и выявить особенности интенсивности расходования ресурса машины при управлении машинистами различной квалификации. Сравнение приемов в управлении машиниста-инструктора и машиниста низкой квалификации показывает, что работа машинистов с высокой квалификацией обеспечивает надежность работы экскаватора, управление процессом копания реализуется в режимах оптимальной нагрузки приводов экскаватора, динамические составляющие соответствуют нормальным режимам эксплуатации.

В таком режиме эксплуатации интенсивность расходования ресурса экскаватора может быть спрогнозирована с достаточной степенью точности, что позволяет рационально управлять процессами ТО и Р. Обучение машинистов экскаваторов является инструментом по повышению долговечности и достижения машиной целевых показателей по наработке.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ


1. *Litvinenko V. S.*, *Bowbrick I.*, *Naumov I. A.*, *Zaitseva Z.* Global guidelines and requirements for professional competencies of natural resource extraction engineers: Implications for ESG principles and sustainable development goals // Journal of Cleaner Production. 2022, vol. 338, pp. 1 — 9. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.130530.

2. *Olt J. J.*, *Maksarov V. V.*, *Efimov A. E.* Improving the surface quality of titanium-alloy components in machining // Russian Engineering Research. 2023, vol. 43, no. 2, pp. 195 — 198. DOI: 10.3103/S1068798X23030255.

3. *Wu H.* Modelling and simulation of electric mining shovels: Ph.D. thesis. Monreal, McGill University, 1995, 159 p.

4. *Бураков А. М.*, *Панишев С. В.*, *Алькова Е. Л.*, *Хосоев Д. В.* Опыт применения гидравлических экскаваторов в сложных горно-геологических и климатических условиях // Горная промышленность. — 2022. — № 2. — С. 90 — 96. DOI: 10.30686/1609-9192-2022-2-90-96.

5. *Ligotsky D. N.* A review of mining and loading equipment currently used for open pit mining // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. 2019, vol. 14, no. 19, pp. 7154 — 7158. DOI: 10.36478/JEASCI.2019.7154.7158.

6. *Анистратов К. Ю.* Анализ эффективности применения экскаваторов УЗТМ-КАРТЭКС на карьерах // Горная промышленность. 2019. — № 5(147). — С. 20 — 24.

7. *Демина Г. А.* Горная техника Группы Газпромбанка: Уралмашзавода и ИЗ КАРТЭКС — на горнодобывающих предприятиях Узбекистана // Горная промышленность. — 2017. — № 4. — С. 40 — 42.

8. *Адмакин М. А.*, *Халимоненко А. Д.*, *Захарова В. П.*, *Нгуен В. Д.* Обрабатываемость резанием маломагнитных высокомарганцовистых сталей // Черные металлы. — 2023. — № 2. — С. 82 — 87. DOI: 10.17580/chm.2023.02.12.

9. *Пряхин Е. И.*, *Трошина Е. Ю.* Изучение технологических и эксплуатационных особенностей высокотемпературостойких композитных пленок для лазерной маркировки деталей из черных сплавов // Черные металлы. — 2023. — № 4. — С. 74 — 80. DOI: 10.17580/chm.2023.04.12.

10. *Gogolynskiy K. V.*, *Gromyka D. S.*, *Kremcheev E. A.* A modelling of cyclic thermal and impact loads on excavator bucket // International Review of Mechanical Engineering. 2021, vol. 15, no. 4, pp. 189—196. DOI: 10.15866/ireme.v15i4.20699.

11. *Kuvshinkin S. Y.*, *Ivanova P. V.* Developing a methodology for estimation of excavation techniques for given operating conditions // IOP Conference Series Earth and Environmental Science. 2019, vol. 378, no. 1, article 012121. DOI: 10.1088/1755-1315/378/1/012121.

12. *Yang Z., Baraldi P., Zio E.* A novel method for maintenance record clustering and its application to a case study of maintenance optimization // Reliability Engineering & System Safety. 2020, vol. 203, pp. 103—107. DOI: 10.1016/j.ress.2020.107103.

13. *Оверченко М. Н.*, *Маринин М. А.*, *Мозер С. П.* Повышение качества подготовки горных инженеров на основе сотрудничества Санкт-Петербургского горного университета и компании Орика // Записки Горного института. — 2017. — Т. 228. — С. 681—687. DOI: 10.25515/PMI.2017.6.681.

14. *Kuznetsov N. K.*, *Makhno D. E.*, *Iov I. A.* Damping elastic oscillations of digging mechanism // IOP Conference Series Earth and Environmental Science. 2017, vol. 87, no. 2, article 22011. DOI: 10.1088/1755-1315/87/2/022011.

15. *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.

16. *Ляшенко Ю. М.*, *Ляшенко А. Ю.*, *Ревякина Е. А.* Применение компьютерных тренажеров в образовательном процессе машинистов одноковшовых экскаваторов как инструмент повышения уровня показателей функционального статуса / Современные прикладные исследования: Материалы Пятой национальной научно-практической конференции. Т. 1. — Новочеркасск: ЮРГПУ, 2021. — С. 236—242.

17. *Андреева Л. И.*, *Мусин Р. И.* Оценка эффективности эксплуатации горнотранспортного оборудования // Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. — 2021. — № 18. — С. 14—19. DOI: 10.31241/FNS.2021.18.003.

18. *Hendricks C., Scoble M. J., Peck J.* Performance monitoring of electric mining shovels. Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy. 1989, vol. 98, pp. A151—A159.

19. *Shibanov D. A.*, *Ivanov S. L.*, *Shishkin P. V.* Digital technologies in modeling and design of mining excavators // Journal of Physics: Conference Series. 2021, vol. 1753, no. 1, article 012052. DOI: 10.1088/1742-6596/1753/1/012052.

20. *Абдрахманов А. А.*, *Сафин Г. Г.*, *Габитов И. А.*, *Титанов А. В.*, *Чернухин С. А.*, *Великанов В. С.* Квалификация персонала как инструмент в повышении эффективности эксплуатации карьерных экскаваторов // Современные наукоемкие технологии. — 2015. — № 12-2. — С. 193—198.

21. *Koellner W.* A new all AC gearless drive system for large mining draglines // Conference Record of 2006 IEEE Industry Applications Conference Forty-First IAS Annual Meeting. 2006, pp. 1310—1314. DOI: 10.1109/IAS.2006.256700.

22. *Костыгова Д. М.*, *Емельянов А. А.* Имитационное моделирование карьерного экскаватора ЭКГ-18Р производства ООО «ИЗ-КАРТЭКС» в тренажере подготовки машинистов // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2017. — № S23. — С. 177—184. DOI: 10.25018/0236-1493-2017-10-23-177-184.

23. *Khorzoughi M. B., Hall R.* Diggability assessment in open-pit mines — A review // International Journal of Mining and Mineral Engineering (IJMME). 2016, vol. 7, no. 3, pp. 181—209. DOI: 10.1504/IJMME.2016.078352.

24. *Великанов В. С.* Прогнозирование нагруженности рабочего оборудования карьерного экскаватора по нечетко-логистической модели // Записки Горного института. — 2020. — Т. 241. — С. 29—36. DOI: 10.31897/PMI.2020.1.29.

25. *Баловнев В. И.*, *Данилов Р. Г.* Продолжительность рабочего процесса важный показатель эффективности технологической машины // Механизация строительства. — 2016. — Т. 77. — № 3. — С. 34—38.

26. *Мислибаев И. Т.*, *Махмудов А. М.*, *Махмудов Ш. А.* Теоретическое обобщение режимов функционирования и моделирование эксплуатационных показателей работы экскаваторов // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2021. — № 1. — С. 102—110. DOI: 10.25018/0236-1493-2021-1-0-102-110.

27. *Кузнецов Н. К.*, *Иов И. А.*, *Долгих Е. С.*, *Храмовских В. А.* Определение параметров упругодемпфирующего устройства в механизмах экскаватора // Системы. Методы. Технологии. — 2022. — № 4(56). — С. 23—29. DOI: 10.18324/2077-5415-2022-4-23-29.

28. *Побегайло П. А.* Исследования динамики одноковшовых гидравлических экскаваторов: современное состояние и некоторые перспективы // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2014. — № 11. — С. 154—158.

29. *Комиссаров А. П.*, *Лагунова Ю. А.*, *Лукашук О. А.*, *Шестаков В. С.* Программное управление процессом экскавации горных пород карьерным экскаватором // Горное оборудование и электромеханика. — 2020. — № 5(151). — С. 28—33. DOI: 10.26730/1816-4528-2020-5-28-33.

30. *Зырянов И. В.*, *Лель Ю. И.*, *Ильбульдин Д. Х.*, *Мартынов Н. В.*, *Ганиев Р. С.* Производительность выемочно-погрузочного оборудования // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. — 2016. — № 8. — С. 11—20.

31. *Комиссаров А. П.*, *Лагунова Ю. А.*, *Набиуллин Р. Ш.*, *Хорошавин С. А.* Цифровая модель процесса экскавации горных пород рабочим оборудованием карьерного экскаватора // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2022. — № 4. — С. 156—168. DOI: 10.25018/0236-1493-2022-4-0-156.

32. *Жариков С. Н.*, *Кутуев В. А.* Энергоемкость выемки горной массы механической лопатой и ее связь со взрывным разрушением горного массива // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. — 2018. — Т. 5. — № 1. — С. 55—59. ГИАБ

## REFERENCES

1. Litvinenko V. S., Bowbrick I., Naumov I. A., Zaitseva Z. Global guidelines and requirements for professional competencies of natural resource extraction engineers: Implications for ESG principles and sustainable development goals. *Journal of Cleaner Production*. 2022, vol. 338, pp. 1—9. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.130530.

2. Olt J. J., Maksarov V. V., Efimov A. E. Improving the surface quality of titanium-alloy components in machining. *Russian Engineering Research*. 2023, vol. 43, no. 2, pp. 195—198. DOI: 10.3103/S1068798X23030255.

3. Wu H. *Modelling and simulation of electric mining shovels*: Ph.D. thesis. Monreal, McGill University, 1995, 159 p.

4. Burakov A. M., Panishev S. V., Alkova E. L., Khosoev D. V. Experience of using hydraulic excavators in complex mining and geological and climatic conditions. *Russian Mining Industry Journal*. 2022, no. 2, pp. 90—96. [In Russ]. DOI: 10.30686/1609-9192-2022-2-90-96.

5. Ligotsky D. N. A review of mining and loading equipment currently used for open pit mining. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2019, vol. 14, no. 19, pp. 7154—7158. DOI: 10.36478/JEASCI.2019.7154.7158.

6. Anistratov K. Yu. Analysis of the effectiveness of UZTM-KARTEKS excavators in quarries. *Russian Mining Industry Journal*. 2019, no. 5(147), pp. 20—24. [In Russ].

7. Demina G. A. Mining equipment of Gazprombank Group: Uralmashzavod and IZ KARTEKS — at mining enterprises of Uzbekistan. *Russian Mining Industry Journal*. 2017, no. 4, pp. 40—42. [In Russ].

8. Admakin M. A., Khalimonenko A. D., Zakharova V. P., Nguen V. D. Machinability of cutting of low-magnetic high-manganese steels. *Chernye Metally*. 2023, no. 2, pp. 82—87. [In Russ]. DOI: 10.17580/chm.2023.02.12.

9. Pryakhin E. I., Troshina E. Yu. Study of technological and operational features of high-temperature-resistant composite films for laser marking of parts made of ferrous alloys. *Chernye Metally*. 2023, no. 4, pp. 74—80. [In Russ]. DOI: 10.17580/chm.2023.04.12.

10. Gogolynskiy K. V., Gromyka D. S., Kremcheev E. A. A modelling of cyclic thermal and impact loads on excavator bucket. *International Review of Mechanical Engineering*. 2021, vol. 15, no. 4, pp. 189—196. DOI: 10.15866/ireme.v15i4.20699.

11. Kuvshinkin S. Y., Ivanova P. V. Developing a methodology for estimation of excavation techniques for given operating conditions. *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*. 2019, vol. 378, no. 1, article 012121. DOI: 10.1088/1755-1315/378/1/012121.

12. Yang Z., Baraldi P., Zio E. A novel method for maintenance record clustering and its application to a case study of maintenance optimization. *Reliability Engineering & System Safety*. 2020, vol. 203, pp. 103—107. DOI: 10.1016/j.ress.2020.107103.

13. Overchenko M. N., Marinin M. A., Mozer S. P. Improving the quality of training of mining engineers on the basis of cooperation between St. Petersburg Mining University and the company Orica. *Journal of Mining Institute*. 2017, vol. 228, pp. 681—687. [In Russ]. DOI: 10.25515/PMI.2017.6.681.

14. Kuznetsov N. K., Makhno D. E., Iov I. A. Damping elastic oscillations of digging mechanism. *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*. 2017, vol. 87, no. 2, article 22011. DOI: 10.1088/1755-1315/87/2/022011.

15. Andreeva L. I. Choice of strategy of repair maintenance of mining equipment. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal*. 2021, no. 4, pp. 83—91. [In Russ]. DOI: 10.21440/0536-1028-2021-4-83-91.

16. Lyashenko Y. M., Lyashenko A. Yu., Revyakina E. A. Application of computer simulators in the educational process of single-bucket excavator operators as a tool to increase the level of functional status indicators. *Sovremennye prikladnye issledovaniya: Materialy Pyatoy natsional'noy nauchno-prakticheskoy konferentsii*. T. 1 [Modern Applied research: Materials of the Fifth National Scientific and Practical Conference], Novocherkassk, YuRGPU, 2021, pp. 236—242. [In Russ].

17. Andreeva L. I., Musin R. I. Assessment of efficiency of mining transport equipment operation. *Trudy Fersmanovskoy nauchnoy sessii GI KNTS RAN*. 2021, no. 18, pp. 14—19. [In Russ]. DOI: 10.31241/FNS.2021.18.003.

18. Hendricks C., Scoble M. J., Peck J. Performance monitoring of electric mining shovels. *Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy*. 1989, vol. 98, pp. A151—A159.

19. Shibanov D. A., Ivanov S. L., Shishkin P. V. Digital technologies in modeling and design of mining excavators. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021, vol. 1753, no. 1, article 012052. DOI: 10.1088/1742-6596/1753/1/012052.

20. Abdrakhmanov A. A., Safin G. G., Gabitov I. A., Titanov A. V., Chernukhin S. A., Velikanov V. S. Personnel qualification as a tool in improving the efficiency of operation of quarry excavators. *Modern High Technologies*. 2015, no. 12-2, pp. 193—198. [In Russ].

21. Koellner W. A New all AC gearless drive system for large mining draglines. *Conference Record of 2006 IEEE Industry Applications Conference Forty-First IAS Annual Meeting*. 2006, pp. 1310—1314. DOI: 10.1109/IAS.2006.256700.

22. Kostygova D. M., Emelyanov A. A. Simulation modeling of the EKG-18R open-pit excavator produced by IZ-KARTEKS LLC in the simulator for training machine operators. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2017, no. S23, pp. 177—184. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2017-10-23-177-184.

23. Khorzoughi M. B., Hall R. Diggability assessment in open-pit mines — A review. *International Journal of Mining and Mineral Engineering (IJMME)*. 2016, vol. 7, no. 3, pp. 181—209. DOI: 10.1504/IJMME.2016.078352.

24. Velikanov V. S. Mining excavator working equipment load forecasting according to a fuzzy-logistic model. *Journal of Mining Institute*. 2020, vol. 241, pp. 29—36. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2020.1.29.

25. Balovnev V. I., Danilov R. G. Duration of the working process is an important indicator of technological machine efficiency. *Mechanization of construction*. 2016, vol. 77, no. 3, pp. 34—38. [In Russ].

26. Mislibayev I. T., Makhmudov A. M., Makhmudov Sh. A. Theoretical generalization of modes and modeling of performance criteria of cutter–loaders. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021, no. 1, pp. 102 — 110. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2021-1-0-102-110.

27. Kuznetsov N. K., Iov I. A., Dolgikh E. S., Khramovskikh V. A. Determination of the parameters of the elastic damping device in excavator mechanisms. *Systems. Methods. Technologies*. 2022, no. 4(56), pp. 23 — 29. [In Russ]. DOI: 10.18324/2077-5415-2022-4-23-29.

28. Pobegaylo P. A. Research dynamics of single-bucket hydraulic excavators: current state and some prospects. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2014, no. 11, pp. 154 — 158. [In Russ].

29. Komissarov A. P., Lagunova Y. A., Lukashuk O. A., Shestakov V. S. Program control of rock excavation process by an open-pit excavator. *Mining equipment and electromechanics*. 2020, no. 5(151), pp. 28 — 33. [In Russ]. DOI: 10.26730/1816-4528-2020-5-28-33.

30. Zyryanov I. V., Lel Y. I., Ilbuldin D. H., Martynov N. V., Ganiev R. S. Performance of excavation and loading equipment. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal*. 2016, no. 8, pp. 11 — 20. [In Russ].

31. Komissarov A. P., Lagunova Yu. A., Nabiullin R. Sh., Khoroshavin S. A. Digital model of shovel work process. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022, no. 4, pp. 156 — 168. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2022-4-0-156.

32. Zharikov S. N., Kutuev V. A. Energy intensity of rock mass excavation by mechanical shovel and its relationship with the explosive destruction of the rock mass. *Mining sciences: fundamental and applied issues*. 2018, vol. 5, no. 1, pp. 55 — 59. [In Russ].

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Шибанов Даниил Александрович*[1] — канд. техн. наук,
доцент, e-mail: shibanov_da@pers.spmi.ru,
ORCID ID: 0000-0002-6203-0219,
*Иванов Сергей Леонидович*[1] — докт. техн. наук,
профессор, e-mail: Ivanov_SL@pers.spmi.ru,
ORCID ID: 0000-0002-7014-2464,
*Шешукова Екатерина Игоревна*[1] — аспирант,
e-mail: s225067@stud.spmi.ru,
*Недашковская Евгения Сергеевна*[1] — аспирант,
e-mail: s225069@stud.spmi.ru,
[1] Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II.
**Для контактов**: Шибанов Д.А., e-mail: shibanov_da@pers.spmi.ru.

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*D.A. Shibanov*[1], Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor,
e-mail: shibanov_da@pers.spmi.ru,
ORCID ID: 0000-0002-6203-0219,
*S.L. Ivanov*[1], Dr. Sci. (Eng.), Professor,
e-mail: Ivanov_SL@pers.spmi.ru,
ORCID ID: 0000-0002-7014-2464,
*E.I. Sheshukova*[1], Graduate Student,
e-mail: s225067@stud.spmi.ru,
*E.S. Nedashkovskaya*[1], Graduate Student,
e-mail: s225069@stud.spmi.ru,
[1] Empress Catherine II Saint-Petersburg Mining University, 199106, Saint-Petersburg, Russia.
**Corresponding author**: D.A. Shibanov, e-mail: shibanov_da@pers.spmi.ru.

Получена редакцией 06.07.2023; получена после рецензии 05.09.2023; принята к печати 10.10.2023.
Received by the editors 06.07.2023; received after the review 05.09.2023; accepted for printing 10.10.2023.