

НАДЕЖНОСТЬ СИСТЕМ СМАЗЫВАНИЯ ГОРНОГО И ГОРНО-ОБОГАТИТЕЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Е.С. Иванова¹, С.Л. Иванов¹, А.С. Корогодин¹, В.А. Плащинский¹

¹ Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II,
Санкт-Петербург, Россия, e-mail: s255079@stud.spmi.ru

Аннотация: Согласно обобщенным данным ремонтных служб горнодобывающих предприятий, нарушения работы смазочных систем горного и горно-обогательного оборудования обуславливают значительную долю отказов подшипников качения и зубчатых передач приводов. Наиболее уязвимыми являются централизованные смазочные системы карьерных экскаваторов, мобильной горной техники, грохотов и дробилок, а также циркуляционные смазочные системы редукторов и опор барабанных мельниц, подъемных установок и конвейеров, работающие в условиях запыленности, вибраций и колебаний температур. Цель работы заключается в обосновании технических и организационных решений, повышающих надежность смазочных систем узлов трения горного и горно-обогательного оборудования. Выполнена классификация смазочных систем по виду смазочного материала (пластичная смазка, смазочное масло) и схемам подвода, обобщены статистические данные по отказам узлов трения, связанным со смазыванием, для основных групп горных машин, а также выделены типовые отказные состояния элементов централизованных смазочных систем (смазочные насосные агрегаты, смазочные дозаторы и смазочные распределители). Предложен подход к селективной сборке смазочных дозаторов для снижения неравномерности подвода пластичной смазки к ресурсопределяющим подшипникам и сформулированы инженерные требования к конструкции смазочных емкостей (масляных баков) циркуляционных смазочных систем, учитывающие время пребывания смазочного масла, дегазацию и осаждение загрязнений, а также тепловой режим. Показано, что комплексная реализация предложенных мер в сочетании с диагностикой состояния смазочных систем (контроль расхода и давления, температурный мониторинг опор, анализ масла) обеспечивает снижение доли отказов, связанных со смазкой, и увеличение межремонтных интервалов подшипниковых опор и редукторов.

Ключевые слова: смазочные системы, горное оборудование, подшипник качения, надежность смазочных систем, централизованная смазочная система, циркуляционная смазочная система, смазочное масло, смазочная емкость (масляный бак), диагностика смазочных систем, обслуживание по техническому состоянию.

Благодарность: Работа выполнена в рамках государственного задания FSRW-2026-0003 «Исследование процессов комплексного освоения недр Земли и глубокой переработки георесурсов». При подготовке текста статьи использовался инструмент искусственного интеллекта Perplexity AI для вспомогательной лингвистической обработки и структурирования материала; авторы несут полную ответственность за достоверность результатов, интерпретацию данных и содержание публикации.

Для цитирования: Иванова Е. С., Иванов С. Л., Корогодин А. С., Плащинский В. А. Надежность систем смазывания горного и горно-обогательного оборудования // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2026. – № 11. – С. 123–144. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_11_0_123.

Reliability of lubrication systems for mining and processing equipment

E.S. Ivanova¹, S.L. Ivanov¹, A.S. Korogodin¹, V.A. Plaschinsky¹

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

Abstract: According to consolidated maintenance records of mining enterprises, malfunctions of lubricating systems in mining and processing equipment account for a significant share of rolling bearing and gear failures in drive units. The most vulnerable are centralised lubricating systems of quarry excavators, mobile mining machinery, screens and crushers, as well as circulating lubricating systems of gearboxes and trunnion bearings of drum mills, hoists and conveyors operating under dusty conditions, subjected to vibration and temperature variations. The aim of this study is to substantiate technical and organisational solutions that increase the reliability of lubricating systems for friction units of mining and processing equipment. The paper presents a classification of lubricating systems by type of lubricant (grease, lubricating oil) and supply scheme, summarises statistical data on lubrication-related failures of friction units for the main groups of mining machines, and identifies typical failure modes of centralised lubricating systems (lubricating pump units, metering devices and distributors). A selective assembly approach for lubricating metering devices is proposed to reduce non-uniform grease delivery to critical rolling bearings, and engineering requirements are formulated for the design of lubricating reservoirs (oil tanks) in circulating lubricating systems, taking into account oil residence time, degassing and contaminant settling processes, as well as thermal conditions. The results demonstrate that combining the proposed measures with condition monitoring of lubricating systems (flow and pressure control, temperature monitoring of bearing housings, oil analysis) reduces the share of lubrication-related failures and increases the overhaul intervals of bearing supports and gearboxes.

Key words: lubricating systems, mining equipment, rolling bearing reliability, centralised lubricating system, circulating lubricating system, lubricating oil, lubricating reservoir (oil tank), lubrication system diagnostics, condition-based maintenance.

Acknowledgements: The work was carried out within the framework of the state task FSRW-2026-0003 «Study of the processes of integrated development of the Earth's interior and deep processing of geological resources». During the preparation of this manuscript, an artificial intelligence-based assistant Perplexity AI was used for auxiliary linguistic editing and structuring of the text; the authors bear full responsibility for the accuracy of the results, the interpretation of the data, and the content of the publication.

For citation: Ivanova E. S., Ivanov S. L., Korogodin A. S., Plaschinsky V. A. Reliability of lubrication systems for mining and processing equipment. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2026;(11):123-144. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_11_0_123.

Введение

Рост единичной мощности и энерговооруженности горного и горно-обогатительного оборудования приводит к повышению требований к надежности ресурсопределяющих узлов трения — подшипников качения и скольжения, зубчатых передач, опор барабанов, редукторов и приводных агрегатов кон-

вейеров и подъемных установок [1 — 3]. По данным ремонтных служб горных предприятий и публикаций, посвященных эксплуатации карьерных экскаваторов, транспортных машин и узлов трения тяжелого оборудования, нарушения смазывания — недостаточный подвод смазочного материала, загрязнение, несоответствие вязкости и класса конси-

стенции, деградация масел и смазок — обуславливают значительную долю отказов подшипников и механических приводов [4–6].

Условия эксплуатации карьерных экскаваторов, мобильной горной техники, грохотов, дробилок, барабанных мельниц и подъемных установок — повышенная запыленность, вибрации, колебания температур, воздействие влаги и агрессивных сред — делают смазочные системы одним из ключевых факторов обеспечения ресурса машин наряду с конструктивной прочностью [7–9] и качеством изготовления узлов [10–12]. Поэтому повышение надежности смазочных систем следует рассматривать как один из наиболее эффективных резервов снижения количества отказов и увеличения межремонтных интервалов горного оборудования [13–15].

Существенный вклад в изучение надежности автоматических централизованных систем смазывания (ЦАС) и обоснование их применения на карьерной технике внесен в работах, выполненных при участии ООО «Техпартнер» [11, 13]. В них показаны преимущества централизованного подвода пластичных смазочных материалов к узлам трения карьерных экскаваторов и автосамосвалов, а также проанализированы типичные отказы элементов дозирующей аппаратуры и трубопроводов. В дальнейшем подход к мониторингу остаточного ресурса опорных подшипников и трансмиссий был развит применительно к трубчатым печам, что обеспечило возможность увязки показателей работы систем смазки с долговечностью опорных узлов.

В существующей специализированной литературе подробно освещены отдельные аспекты обеспечения работоспособности узлов трения: расчет нагрузок и контактных напряжений в подшипниках и передачах, выбор смазочных ма-

териалов, анализ трибологических характеристик и условий смазывания при различных режимах эксплуатации [4, 8, 16]. В то же время для горного и горно-обогатительного оборудования существенно меньше внимания уделено комплексному анализу надежности самих смазочных систем — централизованных систем с подачей пластичного смазочного материала и циркуляционных систем с подачей смазочного масла, включая вопросы выбора пластичного смазочного материала, работоспособности дозирующих устройств, конструкции смазочных емкостей и диагностического сопровождения. В ряде работ приводятся отдельные данные по отказам подшипников и передач, однако они, как правило, не увязаны с конкретными схемами смазывания и потому дают ограниченную основу для принятия инженерных решений по доработке смазочных систем.

В этих условиях актуальной задачей является систематизация сведений о причинах отказов, связанных со смазыванием, для основных групп горного и горно-обогатительного оборудования, увязка таких отказов с типами применяемых смазочных систем и выработка инженерных мер, направленных на повышение их надежности.

Цель настоящего исследования — обосновать технические и организационные решения, повышающие надежность смазочных систем горного и горно-обогатительного оборудования как самостоятельного объекта анализа и проектирования.

Методы исследования

В качестве объекта исследования рассматривались смазочные системы узлов трения горных машин двух групп.

К первой группе отнесены машины открытых горных работ и горно-обогатительных комплексов: карьерные экс-

каваторы, буровые установки, выемочно-транспортирующие машины, сортировочно-обогащительное оборудование (грохоты, дробилки, питатели), а также мобильные горные машины — карьерные самосвалы, колесные и гусеничные погрузчики [13, 17, 18]. Для этих машин характерно применение систем смазывания с подачей пластичного смазочного материала к подшипникам качения и опорным узлам, в том числе автоматических централизованных смазочных систем и индивидуальных смазочных устройств [19]. При этом эксплуатационные свойства пластичного смазочного материала определяются их трибологическими характеристиками, прокачиваемостью и устойчивостью к нагрузкам и температурным воздействиям.

Ко второй группе отнесены стационарные установки подземных и наземных предприятий: шахтные подъемные установки, барабанные мельницы, оборудование гидротранспортных установок, шахтные вентиляторы, насосные станции, приводы ленточных и скребковых конвейеров [8, 14, 20]. Для этой группы оборудования широко применяются циркуляционные системы с подачей смазочного масла к редукторам, подшипниковым опорам барабанов, крупным электродвигателям и вспомогательным агрегатам; при анализе их работоспособности учитывались положения о режимах смешанного смазывания тяжело нагруженных пар трения.

В рамках настоящей работы смазочные системы классифицировались по виду смазочного материала и способу его подачи. Выделялись системы с подачей пластичного смазочного материала, включающие централизованные автоматические системы и локальные устройства смазывания, а также системы с подачей смазочного масла, прежде всего циркуляционные системы редукторов, барабанных агрегатов, мощных элект-

родвигателей и гидроагрегатов. Такое деление позволяет напрямую увязать статистику отказов, механизмы повреждений и требования к конструкции смазочных систем с конкретными группами машин и условиями их работы.

Источниками статистических данных по отказам, связанным со смазыванием, служили эксплуатационные отчеты служб технического обслуживания и ремонта горнодобывающих предприятий, а также опубликованные данные по надежности горного оборудования и его узлов. В обобщение включались сведения, относящиеся к тяжелому горному и горно-обогащительному оборудованию, при наличии в описании отказа прямой связи с нарушением условий смазывания: недостаточным подводом смазочного материала, загрязнением, деградацией смазки или масла, вспениванием и аэрацией. Дополнительно учитывались сведения о характерной наработке между отказами и об условиях эксплуатации машин, что позволяло сопоставлять данные по мобильным и стационарным объектам.

Дополнительно при формировании обобщенных статистических оценок использованы данные многолетнего мониторинга состояния систем смазки карьерной и горно-обогащительной техники ООО «Техпартнер», выполняемого при сопровождении парка машин на горнодобывающих предприятиях России. Указанный мониторинг включал регистрацию отказов узлов трения, анализ причин нарушений работы автоматических централизованных и циркуляционных систем смазки, а также разработку и внедрение корректирующих мероприятий по повышению их надежности.

Обработка данных выполнялась в табличной форме с агрегированием по группам машин и типам смазочных систем. Оценочные доли отказов, связанных со смазыванием, определялись пу-

тем сопоставления диапазонов, приводимых в эксплуатационных материалах и публикациях, с учетом характерных условий работы горного оборудования — запыленности, вибрации, температурных колебаний и воздействия влаги [1, 2, 5]. Такой подход использован для получения сопоставимых интервалов по основным классам машин, а не для получения универсальных коэффициентов.

Для анализа надежности автоматических централизованных смазочных систем с подачей пластичного смазочного материала использован подход, основанный на типизации отказных состояний основных элементов системы: смазочного насосного агрегата, магистральных трубопроводов, дозаторов, распределителей и контрольных элементов. В качестве критерия равномерности подачи смазочного материала принято относительное отклонение расхода по каналам одного распределителя от среднего значения. Для критически нагруженных подшипников допустимым считался уровень не более $\pm 15\%$. Предложения по селективной сборке дозирующих устройств формировались на основе сопоставления фактических подач по каналам и оценки влияния разброса параметров на равномерность смазывания.

Оценка параметров смазочных емкостей циркуляционных систем проводилась с использованием инженерных расчетных зависимостей гидродинамики [21 — 23]. Время пребывания масла в баке определялось по выражению

$$t_{\text{res}} = \frac{V_{\text{эфф}}}{Q} \geq t_{\text{мин}}, \quad (1)$$

где $V_{\text{эфф}}$ — эффективный объем бака; Q — расход масла; скорость осаждения частиц по закону Дж. Стокса — по выражению

$$v_{\text{см}} = \frac{2r^2(\rho_{\text{ч}} - \rho_{\text{м}})g}{9\mu}, \quad (2)$$

где r — радиус частиц; $\rho_{\text{ч}}$ — плотность частиц; $\rho_{\text{м}}$ — плотность масла; g — ускорение свободного падения; μ — динамический коэффициент вязкости.

Указанные зависимости применялись для выработки инженерных критериев выбора объема бака, расположения сливных и всасывающих патрубков, а также компоновки перегородок, обеспечивающих дегазацию, снижение турбулентности и уменьшение переноса загрязнений в зону всасывания. Для оценки по формуле (1): при $Q = 40$ л/мин и $V_{\text{эфф}} = 300$ л время пребывания масла составит $\tau = 7,5$ мин, что обеспечивает необходимые условия для дегазации. Для оценки по формуле (2): скорость осаждения частиц размером $r = 25$ мкм (пыль, продукты износа) в масле типа ИГП-30 при рабочей температуре ($\eta \approx 0,05$ Па·с, $\rho_{\text{ч}} = 2700$ кг/м³, $\rho_{\text{м}} = 870$ кг/м³) составит $v_{\text{ст}} \approx 1,2 \cdot 10^{-4}$ м/с; при высоте отстойной зоны бака 0,3 м время осаждения частицы — около 42 с, что существенно меньше времени пребывания масла. Таким образом, при правильно рассчитанном объеме бака условия осаждения загрязнений выполняются. CFD-моделирование на данном этапе не проводилось; расчетные зависимости применялись как инструмент сравнительной инженерной оценки конструктивных вариантов.

Систематизация конструктивных решений смазочных емкостей и оценка диагностически значимых признаков нарушения смазывания выполнялись на основе анализа технической литературы по расчету смазочных систем и работ, посвященных распознаванию режимов масляного голодания подшипников по вибрационным признакам.

Расчеты и табличные оценки выполнены в MS Excel с использованием стандартных математических функций; для обобщения данных применялись средние значения и интервальные оценки.

При подготовке рукописи использовался инструмент искусственного интеллекта Perplexity AI для вспомогательной лингвистической обработки текста, унификации терминологии и структурирования отдельных фрагментов изложения. Запросы включали в себя: «Исправить стилистические и грамматические ошибки», «Найти все варианты написания термина „смазка“ и заменить на „смазывание“», «Найти все варианты написания термина „пластичная смазка“ и заменить на „пластичный смазочный материал“», «Представить основные тезисы в виде маркированного списка». Все научные положения, интерпретация результатов, отбор источников и окончательная редакция текста выполнены авторами.

Результаты

Анализ опубликованных данных по отказам подшипников и зубчатых передач, а также эксплуатационных сведений по горному и горно-обогатительному оборудованию показывает, что существенная доля повреждений связана с нарушением условий смазывания [8, 14, 20]: недостаточным подводом смазочного материала, его загрязнением, деградацией эксплуатационных свойств, вспениванием и аэрацией масла. Для тяжело нагруженных узлов это приводит к ухудшению условий формирования смазочной пленки, росту температуры, ускоренному износу поверхностей трения и сокращению ресурса подшипников и передач [21, 23, 24]. Дополнительное влияние оказывает состояние масла и возможность его оперативного контроля, поскольку деградация смазочного материала во многих случаях развивается постепенно и первоначально не вызывает внешне очевидных признаков отказа.

Обобщение рассмотренных источников [25 – 27] позволило установить, что

для мобильной техники и машин, применяемых на открытых горных работах, с подачей пластичного смазочного материала характерна наиболее высокая доля отказов, связанных со смазыванием, тогда как для стационарных агрегатов с циркуляционными масляными системами эта доля, как правило, ниже, но последствия отдельных отказов оказываются более тяжелыми. Для барабанных мельниц, редукторов и опор тяжелых агрегатов нарушение циркуляции масла, загрязнение и локальный перегрев особенно опасны, поскольку развиваются на фоне высоких контактных нагрузок и значительной тепловой инерции узла. На этой основе сформированы обобщенные данные по причинам отказов различных групп оборудования в зависимости от применяемой смазочной системы (табл. 1).

Обобщение статистических данных, приведенных в табл. 1, показывает, что для карьерных экскаваторов, буровых установок, выемочно-транспортирующих машин и мобильной карьерной техники основными причинами отказов выступают недостаточная подача пластичного смазочного материала, несоответствие его консистенции условиям эксплуатации, загрязнение твердыми частицами и влагой, а также нарушение герметичности зон смазывания. Диапазоны долей отказов (40 – 70% для подшипников качения и привода в целом, 20 – 40% для зубчатых передач и др.) получены на основе совокупного анализа литературных источников и эксплуатационных данных ООО «Техпартнер». При этом статистические ряды по отдельным предприятиям и типам машин нормировались по объему выборки и длительности наблюдений, а затем агрегировались в укрупненные интервалы, приведенные в табл. 1. Такой подход позволил сохранить связь с реальными условиями эксплуатации при приемлемой обобщенно-

Таблица 1

Причины отказов подшипников и передач различных групп горного оборудования в зависимости от типа смазочной системы* [составлено авторами]

Causes of failures of bearings and gears of various groups of mining equipment, depending on the type of lubrication system [compiled by the authors]

Группа оборудования	Тип смазочного материала	Основные причины отказов, связанные со смазыванием	Оценочная доля отказов, %
Карьерные экскаваторы, буровые установки, выемочно-транспортирующие машины	Пластичный (ЦАС, ручная)	Недостаточная подача смазочного материала; несоответствие класса NLGI условиям; загрязнение твердыми частицами и влагой; вымывание смазочного материала водой	40 – 60
Мобильные горные машины (самосвалы, погрузчики, буровые установки на шасси)	Пластичный (ЦАС, частично масляные ванны)	Недостаточная периодичность смазывания; отказ ЦАС; перегрев ступиц и подшипников; попадание пыли и грязи; нарушение целостности уплотнений	40 – 70
Грохоты, дробилки, питатели	Пластичный для подшипников и опор	Недостаточное количество смазки из-за неравномерного распределения; вибрационное выдавливание смазочного материала; старение при вибрациях и температурных колебаниях	30 – 50
Шахтные подъемные установки	Жидкий многократно используемый для редукторов и подшипников	Потеря подачи масла; вспенивание и аэрирование; перегрев; загрязнение и деградация масла; кавитация насосов	30 – 50
Барабанные мельницы	Жидкий многократно используемый для опор и передач	Нарушение циркуляции масла; деградация его свойств; неправильный тепловой режим; отложение осадков в системе	до 50
Оборудование гидротранспорта, насосные станции	Жидкий многократно используемый для подшипников и уплотнений	Загрязнение и аэрация масла; перегрев вследствие повышенной нагрузки; кавитация в насосах; нарушение герметичности	20 – 40
Шахтные вентиляторы, приводы ленточных конвейеров	Жидкий и пластичный (комбинированно)	Загрязнение; несоблюдение регламентов замены; неправильный выбор вязкости и присадок; недостаточный контроль состояния	30 – 50
* Нароботка между отказами по смазочным системам — 500 – 3000 ч.			

сти результатов. Вместе с тем указанные интервалы следует рассматривать как ориентировочные оценки для типовых групп оборудования, а не как нормативные значения для конкретных предприятий. Таким образом, для мобильной карьерной техники и экскаваторов доля отказов подшипников и приводных уз-

лов, непосредственно связанных с нарушениями смазывания, составляет 40 – 70%, для стационарных агрегатов с циркуляционными масляными системами (шахтные подъемные установки, барабанные мельницы, конвейерные приводы) — 30 – 50% (см. табл. 1). Эти значения подтверждаются данными ремонтных

служб и многолетними наблюдениями ООО «Техпартнер».

Для стационарного оборудования с циркуляционной системой жидкостного смазывания основными причинами отказов выступают потеря подачи масла, вспенивание и аэрирование, загрязнение, деградация масла и нарушение теплового режима. Для шахтных подъемных установок и барабанных мельниц эти причины особенно критичны, поскольку даже кратковременное ухудшение условий смазывания может приводить к ускоренному повреждению подшипниковых опор, цапф и зубчатых передач. Поэтому данные табл. 1 следует рассматривать не только как статистическое обобщение, но и как основание для выбора приоритетных мероприятий по повышению надежности конкретного класса оборудования.

Типизация состояний отказов автоматических централизованных систем с подачей пластичного смазочного материала (табл. 2) показала, что наибольшее влияние на надежность оказывают неисправности насосного агрегата, магистральных трубопроводов, дозаторов, распределителей и контрольных элементов [28, 29]. Для этих систем принципиальное значение имеет не только факт подачи смазочного материала, но и равномерность его распределения между точками смазывания. Разброс параметров элементов системы и отклонения режима работы могут приводить к заметной неравномерности смазывания, что при тяжелых режимах нагружения создает условия для локального масляного голодания отдельных подшипников.

Установлено, что разброс подачи смазочного материала по каналам распределительных устройств в неблагоприятных условиях может достигать $\pm 25 - 30\%$, тогда как для критически нагруженных узлов допустимый уровень должен быть существенно ниже. Это означает, что да-

же при формально исправной системе часть точек смазывания может получать недостаточное количество смазочного материала. В результате возникают локальные перегревы, ускоренное старение смазочного материала, задиры и снижение ресурса подшипниковых и шарнирных соединений. Надежность централизованной смазочной системы должна рассматриваться совместно с надежностью смазываемых узлов, а предотвращение отказов требует комплексного подхода к выбору смазочного материала, конструкции распределительных устройств и организации диагностики [29 – 31].

Для снижения неравномерности подачи целесообразно применять селективную сборку дозирующих и распределительных элементов, при которой сочетание компонентов подбирается с учетом фактического разброса их параметров. Как показывает анализ эксплуатационных данных, применение такого подхода позволяет снизить отклонение подачи по каналам с $\pm 25 - 30\%$ (при серийном исполнении) до уровня $\pm 10 - 15\%$, что обеспечивает надежное смазывание ресурсопределяющих подшипников, при допустимом критерии неравномерности не более $\pm 15\%$. Такой подход позволяет приблизить распределение смазочного материала к требуемому уровню для критически нагруженных точек. На практике это предполагает уточнение требований к комплектованию и контролю элементов системы, однако не требует принципиального изменения схемы смазывания и может быть реализовано в рамках существующих конструкций ЦАС.

Обобщение данных, приведенных в табл. 3, показывает, что надежность циркуляционных смазочных систем в значительной степени определяется не только параметрами насосов, фильтров и трубопроводов, но и конструкцией смазочного бака.

Таблица 2

Типичные отказы компонентов автоматических централизованных систем с пластичным смазочным материалом и их влияние на надежность узлов трения [составлено авторами]

Typical failures of components of automatic centralized systems with plastic lubricants and their impact on the reliability of friction units [compiled by the authors]

Компонент системы	Тип отказа / дефект	Влияние на узлы машин	Рекомендуемые предупредительные меры
Насосный агрегат (станция смазки)	Отказ привода; кавитация насоса; подсос воздуха; разгерметизация всасывающей линии	Полная или частичная потеря подачи смазочного материала ко всем точкам; быстрое разрушение подшипников; образование захвата и задира в шарнирах	Установка датчиков давления и расхода; резервирование или дублирование насосов; сигнализация при отказе
Магистральные трубопроводы и соединения	Механическое повреждение; разгерметизация стыков; засорение внутренних поверхностей; вибрационное разрушение	Локальное недостаточное количество смазки отдельных узлов; перегрев вследствие сухого трения; асимметричная подача к точкам	Защитные кожухи трубопроводов; герметизирующие заглушки; периодический контроль давления в линиях; упругие крепления
Распределители (прогрессивные, двухлинейные, однолинейные)	Засорение дозирующих отверстий; заклинивание плунжеров; внутренний износ; нарушение герметичности; неточность дозирования	Неравномерность подачи смазочного материала между точками; скрытая недостаточность смазки отдельных критических подшипников; вибрационные повреждения	Селективная сборка дозаторов с компенсацией допусков; фильтрация входящего смазочного материала; контроль циклов и давления; диагностика расходораспределения
Контрольные элементы (датчики давления, индикаторы цикла, реле расхода)	Отказ датчика; коррозия контактов; нарушение герметичности корпуса; отсутствие реакции на сигнал	Несвоевременное обнаружение отказа подачи или разгерметизации системы; скрытые дефекты, приводящие к аварийному отказу подшипников	Дублирование датчиков; применение датчиков с дополнительной диагностикой; тестовые циклы при пуске; мониторинг в режиме реального времени
Консистентный смазочный материал	Несоответствие класса NLGI температурным условиям; потеря прокачиваемости при низких температурах; окисление и деградация при вибрациях; попадание влаги и примесей	Отказ ЦАС при холодных пусках; недостаточное количество смазки для отдаленных точек; ускоренное старение смазочного материала; коррозия в узлах трения	Подбор смазочного материала по NLGI, диапазону вязкости и температурным условиям; испытания на прокачиваемость и износостойчивость; регулярная замена в соответствии с регламентом

Таблица 3

Конструктивные особенности масляных баков циркуляционных смазочных систем и риски при упрощенном исполнении [составлено авторами]

Design features of oil tanks of circulating lubrication systems and risks of simplified design [compiled by the authors]

Область применения (машина / агрегат)	Типовые конструктивные решения	Основные риски при простой конструкции	Рекомендуемые конструктивные улучшения
Редукторы шахтных подъемных установок	Простой цилиндрический или прямоугольный резервуар с минимальными внутренними перегородками; боковое или нижнее всасывание	Интенсивное вспенивание; захват воздуха при быстром возврате сливного масла; перенос грязи и осадков из сливной зоны во всасывающий патрубок	Добавление перегородок; организация отстойных камер; успокоительные зоны перед всасыванием; дегазационные устройства; увеличение времени пребывания масла
Циркуляционное смазывание опор барабанных мельниц	Общий или частично разделенный бак для нескольких опор и зубчатых передач; циркуляция через фильтр и охладитель	Неравномерное качество масла по объему бака; локальный перегрев отдельных потоков возврата; ускоренная деградация масла в нагруженных зонах	Разделение потоков прямого и сливного масла; создание локальных отстойников; оптимизация объема с учетом расходов; интеграция датчиков температуры
Насосные станции вспомогательного оборудования, вентиляторы	Компактные баки с ограниченным объемом (обусловлено габаритами); интегрированный фильтр; естественное охлаждение	Ускоренная деградация масла; высокая чувствительность к загрязнениям и влаге; недостаточная дегазация; нестабильность работы при перегрузках	Увеличение запасов объема (по возможности); интеграция качественных многоступенчатых фильтров; установка микродегазаторов; датчики уровня и содержания воды
Мощные редукторы конвейеров и приводной техники	Бак в одном блоке с редуктором (моноблочная конструкция); ограниченный доступ для обслуживания; циркуляция через встроенные магистрали	Перегрев масла при неудачной геометрии потоков; трудность периодической очистки и контроля осадка; неудобство замены фильтров; невозможность визуального контроля	Вынесенные или модульные баки, сопряженные с редуктором; внутренние системы перегородок и успокоительных щитов; смотровые люки; комбинированные дренажи; интеграция датчиков для предиктивного обслуживания

При исполнении упрощенного бака возрастают риски вспенивания, повторного захвата воздуха, переноса загрязнений в зону всасывания и локального перегрева масла. Для тяжело нагруженных агрегатов горного оборудования это

особенно критично, поскольку ухудшение гидродинамических условий в баке отражается не только на работе насоса, но и на стабильности смазывания подшипников, редукторов и опор барабанов. Полученные результаты показыва-

ют, что для устойчивой работы циркуляционной системы бак должен не только выполнять функцию запаса масла, но и обеспечивать дегазацию, частичное охлаждение, осаждение механических примесей и стабилизацию потока перед всасыванием. Это достигается за счет разделения потоков грязного и очищенного масла, введения внутренних перегородок, организации отстойных и успокоительных зон, а также рационального расположения сливных и всасывающих патрубков. При отсутствии этих решений возрастает вероятность кавитации насосов, неустойчивости давления в магистральной и ускоренной деградации масла.

С инженерной точки зрения одним из ключевых параметров работы бака является время пребывания в нем масла. По расчетным оценкам с использованием выражения (1), при типовом расходе насоса циркуляционной системы барабанной мельницы $Q = 40$ л/мин и объеме бака $V_{\text{эфф}} = 300$ л время пребывания составит $\tau = 300/40 = 7,5$ мин, что соответствует рекомендуемому диапазону 5–10-кратного минутного расхода насоса. Для горного оборудования, работающего в условиях высокой запыленности, переменных нагрузок и длительных смен, минимально допустимых значений объема, принятых для общего машиностроения (как правило, 3–4-кратный расход), недостаточно — они не обеспечивают требуемой дегазации и осаждения частиц.

Отдельное значение имеет ограничение турбулентности потока возвратного масла. Если сливной поток направляется непосредственно в зону всасывания или вызывает интенсивное перемешивание содержимого бака, это приводит к росту аэрации, вспениванию и повторному вовлечению загрязнений в рабочий контур. В результате снижается устойчивость масляной пленки в контактах подшипников и зубчатых пере-

дач, повышается температура и возрастает вероятность интенсивного изнашивания тяжело нагруженных узлов.

Практическая значимость представленных в табл. 3 результатов состоит в том, что они позволяют связать конструктивные решения бака с характерными эксплуатационными рисками для конкретных типов оборудования. Для редукторов шахтных подъемных установок и конвейеров приоритетными являются снижение вспенивания и обеспечение устойчивого всасывания насоса; для барабанных мельниц — выравнивание качества масла по объему бака, снижение локального перегрева и уменьшение переноса осадка, для компактных насосных станций и вентиляторных агрегатов — увеличение эффективного объема, улучшение фильтрации и контроля содержания воды. Таким образом, конструкция смазочного бака должна рассматриваться как активный элемент повышения надежности всей смазочной системы, а не как вспомогательный резервуар.

Важным дополнением к конструктивным мерам является мониторинг состояния смазочных систем, обобщенный в табл. 4. Анализ показывает, что для ресурсопределяющих узлов горного оборудования наибольшую диагностическую ценность имеют температура, вибрация, давление и расход смазочного материала, а также показатели состояния масла — содержание твердых частиц, воды и продуктов окисления. Совместный контроль этих параметров позволяет выявлять ухудшение условий смазывания на ранней стадии, до развития тяжелого отказа подшипника, редуктора или опоры барабана.

Для подшипников опор барабанных мельниц и печей приоритетными являются вибродиагностика, температурный контроль и анализ масла, поскольку именно эти методы позволяют фикси-

Таблица 4

Методы мониторинга и контроля смазочных систем оборудования**[составлено авторами]****Methods of monitoring and control of equipment lubrication systems [compiled by the authors]**

Тип машины / узла трения	Тип смазочного материала	Основные контролируемые параметры	Применяемые методы диагностики и их периодичность / регламент
Подшипники опор барабанных мельниц, печей	Жидкий многократно используемый	Температура корпуса и подшипника; вибрация (низко-, средне- и высокочастотные составляющие); анализ масла; уровень и давление масла	Вибродиагностика (виброметрия, анализ спектра); акустическая эмиссия; спектральный анализ масла; контроль уровня и давления; инфракрасная термография. Ежедневный/ежемесячный контроль параметров; анализ масла — раз в квартал; капитальная проверка — ежегодно
Редукторы подъемных установок и конвейеров	Жидкий многократно используемый	Температура зубчатых колес и подшипников; вибрация редуктора; состояние масла; давление и расход масла в магистралях	ИК-термография; спектральный анализ масла; вибродиагностика; контроль расхода и давления; осмотр фильтров. Ежедневный визуальный контроль; ежемесячный контроль параметров; анализ масла — 1-2 раза в год
Карьерные экскаваторы, буровые установки, выемочно-транспортующие машины	Пластичный (ЦАС)	Давление в магистралях ЦАС; цикл подачи (количество импульсов); расход смазочного материала на выходе; визуальный контроль дозаторов; состояние уплотнений узлов трения	Контроль давления в ЦАС (датчики, манометры); анализ циклов дозаторов; визуальный осмотр соединений и уплотнений; периодический анализ износа пальцев и втулок. Ежедневный контроль при пуске; ежедневный контроль основных параметров; квартальный осмотр и регулировка
Подшипники грохотов, дробилок, питателей	Пластичный	Температура корпусов подшипников; вибрация узлов; визуальное состояние смазочного материала на выходе из уплотнений; количество и качество выделяемого смазочного материала	Вибродиагностика; термография; визуальный контроль смазочного материала на уплотнениях; анализ содержания твердых включений; проверка работы дозаторов. Ежедневный визуальный контроль; ежемесячный контроль вибрации; проверка состояния смазки — раз в квартал

ровать развитие масляного голодания, рост трения и накопление продуктов изнашивания. Для редукторов подъемных установок и конвейеров особое значение имеет контроль температуры зубчатых передач и подшипников, а также давления и расхода масла в магистрали, поскольку нарушения циркуляции быстро

отражаются на тепловом режиме узла. Для машин с централизованной подачей пластичного смазочного материала наиболее информативны контроль давления в ЦАС, отслеживание циклов подачи, визуальная оценка работы дозаторов и контроль состояния уплотнений [32 — 34].

Результаты, представленные в табл. 4, показывают, что переход от периодического визуального осмотра к инструментальному мониторингу позволяет существенно повысить выявляемость скрытых дефектов смазочных систем. Это особенно важно для горного оборудования, работающего в тяжелых условиях и при высокой стоимости внепланового простоя. В таких условиях своевременное обнаружение снижения подачи смазочного материала, загрязнения масла или роста вибрации позволяет перевести обслуживание из аварийного режима в предупредительный, а в перспективе — в предиктивный.

Тем самым результаты анализа по табл. 3 и 4 подтверждают, что повышение надежности смазочных систем должно обеспечиваться сочетанием конструктивных и диагностических решений. Рациональное проектирование смазочных баков уменьшает вероятность аэрации, вспенивания и переноса загрязнений, а мониторинг параметров смазывания позволяет своевременно выявлять начальные стадии отказов и корректировать режимы обслуживания. Совместное применение этих мер создает основу для увеличения межремонтного ресурса подшипников, передач и опорных узлов горного и горно-обогатительного оборудования [35 – 36].

Надежность ресурсопределяющих элементов горного оборудования — подшипниковых опор, зубчатых передач, опор барабанов, редукторов и приводных электродвигателей — непосредственно связана с качеством смазывания и состоянием смазочного материала. Для тяжело нагруженных узлов нарушение подачи смазочного материала, его загрязнение, аэрация или деградация не только повышают интенсивность изнашивания, но и сокращают остаточный ресурс оборудования, причем скорость развития повреждения определяется ре-

жимом нагрузки и условиями эксплуатации. На этой основе обобщены характерные признаки критических отказов смазочных систем и их влияние на ресурс подшипников и передач (табл. 5).

Данные табл. 5 показывают, что наиболее опасными являются отказы, связанные с полной потерей подачи смазочного материала и выраженной неравномерностью его распределения по точкам смазывания. В таких случаях ухудшение состояния узла развивается ускоренно: сначала фиксируются рост температуры, изменение вибрационного сигнала, шум и локальные признаки масляного голодания, после чего при продолжении работы происходит резкое сокращение остаточного ресурса подшипников и передач. Для централизованных систем с подачей пластичного смазочного материала это особенно характерно при отказах насосного агрегата, засорении дозаторов и нарушении герметичности магистралей.

Для циркуляционных систем жидкостного смазывания наибольшую опасность представляют вспенивание, аэрирование и загрязнение масла, поскольку такие нарушения воздействуют одновременно на гидродинамические условия в подшипниковом узле, температурный режим и устойчивость работы насосной части. При этом снижение остаточного ресурса может происходить не мгновенно, а в течение сравнительно продолжительного периода, что создает ложное впечатление работоспособности системы. Именно поэтому для редукторов подъемных установок, барабанных мельниц и других стационарных горных машин особенно важен не только контроль факта работы системы, но и оценка качества смазывания по совокупности диагностических признаков.

Обобщение практических примеров, приведенных в табл. 5, показывает, что одинаковый по виду отказ смазочной

Таблица 5

Взаимосвязь отказов смазочных систем с остаточным ресурсом подшипников и передач [составлено авторами]

The relationship of lubrication system failures with the remaining life of bearings and gears [compiled by the authors]

Вид критичного отказа смазочной системы	Наблюдаемые признаки в узлах трения	Типовое снижение остаточного ресурса	Примеры из практики горного оборудования
Полная потеря подачи смазочного материала (отказ насоса, разгерметизация)	Быстрый рост температуры подшипника (за 5–10 мин); появление металлического звука; слышимость щелчков, скрипов; вибрация	Отказ за 0,5–2 часа; полное разрушение за 1–3 смены	Отказ ЦАС на экскаваторе; заклинивание редуктора подъемной установки после 1–2 часов работы без смазывания
Значительная неравномерность подачи смазочного материала (засорение дозатора, заклинивание)	Локальный перегрев отдельных подшипников; неравномерное окрашивание и откладывание смазочного материала; появление задиров в шарнирах	Снижение на 40–60%; полный отказ за 2–4 недели интенсивной работы	Неправильный выбор смазочного материала по NLGI привел к недостаточному смазыванию отдаленных подшипников экскаватора за 2–3 дня
Вспенивание, аэрирование масла в циркуляционной системе	Пенистое масло в сливном резервуаре; кавитация насоса; перепады давления в магистрали; повышение шума; нестабильность температуры	Снижение на 30–50%; постепенное разрушение за 1–2 месяца	Попадание воды в масло мельницы; вспенивание при быстрых циклах возврата масла из-за отсутствия перегородок в баке
Загрязнение масла абразивными частицами	Ускоренный износ уплотнений; появление царапин на поверхностях подшипников; рост вибрации; изменение цвета масла на темный	Снижение на 20–40%; отказ за 3–6 месяцев интенсивной работы	Несвоевременная замена фильтра в циркуляционной системе редуктора привела к износу, ускоренному в 1,5–2 раза
Дегградация смазочного материала (окисление, потеря присадок)	Гелеобразный осадок в узлах; появление коррозии; рост коэффициента трения; локальные прижоги и задиры	Снижение на 10–30%; отказ за 6–12 месяцев при высокой нагрузке	Переиспользование консистентной смазки без замены в ЦАС грохота привело к преждевременному отказу подшипника за 9 месяцев (вместо 3 лет)

системы может вызывать различную скорость дегградации узла в зависимости от его конструкции и режима нагружения. Для высоконагруженных подшип-

ников и передач даже кратковременное ухудшение условий смазывания способно привести к необратимым повреждениям поверхностей трения, тогда как

в менее напряженных узлах дефект может развиваться скрыто и проявляться в форме интенсивного изнашивания в течение недель или месяцев. Это подтверждает необходимость перехода от формального контроля наличия смазочного материала к оценке его фактической работоспособности в конкретной системе.

Обсуждение

Полученные результаты подтверждают, что доля отказов, связанных со смазыванием, для горного и горно-обогательного оборудования остается высокой и определяется не только типом смазочного материала, но и конструкцией самой смазочной системы, а также качеством ее обслуживания. Для машин с подачей пластичного смазочного материала решающую роль играют стабильность дозирования, пропускная способность магистралей и корректный выбор смазочного материала, тогда как для циркуляционных систем определяющими становятся гидродинамика потока, чистота и дегазация масла, а также условия работы смазочного бака. Тем самым надежность смазывания должна рассматриваться как самостоятельный фактор обеспечения ресурса оборудования, а не только как часть регламентного технического обслуживания.

Сопоставление данных табл. 1 — 5 показывает, что наиболее уязвимыми являются узлы, работающие в условиях сочетания высоких нагрузок, вибрации, загрязнения и переменных температур. Именно для таких объектов даже сравнительно небольшие нарушения подачи смазочного материала или ухудшение его свойств вызывают ускоренное разрушение подшипников, передач и опорных поверхностей. С этой точки зрения предложенные меры — повышение равномерности подачи, совершенствование конструкции масляных баков и внедре-

ние мониторинга — являются взаимодополняющими, поскольку каждая из них воздействует на механизм отказа.

Выделенные типовые отказы компонентов автоматических централизованных систем смазывания согласуются с практикой эксплуатации горных машин. Неравномерность подачи смазочного материала по каналам дозаторов, отказ насосного агрегата, засорение магистралей и нарушение герметичности приводят к локальному недостаточному смазыванию критически нагруженных подшипников и шарнирных соединений. Даже при формально работоспособной системе недостаточная подача может длительное время оставаться незамеченной, а затем обернуться внезапным отказом узла. Это объясняет, почему для систем с подачей пластичного смазочного материала особое значение имеют не только контроль наличия давления, но и оценка цикличности подачи, расхода и фактической работы дозаторов.

Предложенный подход к повышению равномерности подачи за счет более точного подбора и комплектования распределительных элементов представляет практический интерес, поскольку позволяет снизить риск локального масляного голодания без принципиального усложнения схемы смазывания. В отличие от полной замены системы, такие меры могут быть реализованы в рамках модернизации существующих конструкций и уточнения требований к сборке и диагностике. Для горного оборудования это особенно важно, поскольку эксплуатация в запыленной среде, при вибрации и широком диапазоне температур предъявляет повышенные требования к устойчивости ЦАС и затрудняет поддержание одинаковых условий подачи по удаленным точкам смазывания.

Результаты анализа циркуляционных систем жидкостного смазывания показывают, что надежность таких систем

в значительной степени определяется конструкцией смазочного бака. При недостаточном времени пребывания масла, отсутствии разделения потоков и неудачном расположении всасывающих и сливных патрубков возрастает вероятность вспенивания, аэрации, повторного захвата загрязнений и возникновения кавитации насосов [35]. Эти процессы ухудшают условия формирования смазочной пленки и тем самым ускоряют развитие повреждений в тяжело нагруженных опорах, редукторах и барабанных агрегатах. Следовательно, бак должен рассматриваться не как вспомогательная емкость, а как функциональный элемент, непосредственно влияющий на надежность смазочной системы.

Инженерные расчеты параметров бака, использованные в работе, носят оценочный характер и основаны на стандартных гидрогазодинамических зависимостях. Они позволяют сформулировать требования к объему бака, времени пребывания масла, условиям осаждения частиц и ограничению турбулентности, однако не учитывают всей сложности реальных течений в баках горного оборудования. В частности, при работе на переменных режимах, при высоком расходе возвратного масла и сложной геометрии внутренних полостей, где значимую роль могут играть локальные вихревые зоны, неравномерность распределения температуры и повторное вовлечение пузырьков воздуха [36, 37]. Поэтому для дальнейшего уточнения предложенных рекомендаций целесообразно использовать CFD-моделирование и стендовые испытания, ориентированные на конкретные типы оборудования и режимы эксплуатации.

Существенным результатом является также подтверждение высокой значимости мониторинга смазочных систем. Для тяжелого горного оборудования периодический визуальный осмотр не

обеспечивает своевременного выявления скрытых дефектов, особенно в случаях частичной потери подачи, ухудшения качества масла или локального перегрева. Более информативным является сочетание вибродиагностики, температурного контроля, анализа масла, а также контроля расхода и давления смазочного материала [38–40]. Такой подход позволяет выявлять начальные стадии отказа, оценивать тенденцию изменения состояния узла и принимать решение о корректировке обслуживания до наступления аварийного повреждения.

С практической точки зрения переход к инструментальному мониторингу особенно важен для барабанных мельниц, редукторов подъемных установок, конвейерных приводов и других узлов с высокой стоимостью внепланового простоя. В этих случаях даже сравнительно небольшое увеличение межремонтного ресурса дает заметный производственный эффект. Кроме того, данные мониторинга создают основу для перехода от регламентного обслуживания по наработке к предупредительному и предиктивному обслуживанию, при котором решения принимаются по фактическому состоянию системы. Это соответствует современным тенденциям цифровой трансформации технического обслуживания промышленного оборудования.

Сравнение полученных выводов с известными зарубежными и отечественными подходами показывает, что в мировой практике уже реализуются решения, направленные на интеллектуализацию смазочных систем, повышение точности дозирования и совершенствование конструкций масляных баков. Вместе с тем для условий горной промышленности остается актуальной задача адаптации таких решений к повышенной запыленности, ударно-вибрационным нагрузкам, сезонным колебаниям температуры и

ограниченным возможностям оперативного обслуживания в условиях действующего производства [40, 41]. Поэтому предложенные в работе инженерные меры следует рассматривать как основу для поэтапной модернизации смазочных систем, а не как универсальное разовое решение.

Ограничением настоящего исследования является то, что приведенные оценки снижения ресурса и доли отказов имеют обобщенный характер и основаны на совокупности опубликованных источников, инженерных расчетов и эксплуатационных данных, а не на результатах длительных натурных испытаний единой серии оборудования. Вследствие этого конкретные эффекты от внедрения предложенных решений на отдельном предприятии могут различаться в зависимости от конструкции машин, режима их работы, качества технического обслуживания и климатических условий. Тем не менее, выявленные закономерности позволяют выделить наиболее критические элементы смазочных систем и сформировать практически применимые направления повышения их надежности.

Таким образом, обсуждение результатов показывает, что повышение надежности смазывания должно обеспечиваться комплексно: за счет оптимизации распределения пластичного смазочного материала в централизованных системах, совершенствования конструкции смазочных баков циркуляционных систем, а также внедрения методов непрерывного или периодического мониторинга состояния узлов и смазочного материала.

Только совместная реализация этих мер позволяет снизить долю отказов, связанных со смазыванием, и обеспечить увеличение межремонтного ресурса горного и горно-обогачительного оборудования [38–40].

Выводы

1. Нарушения смазывания являются одной из доминирующих причин отказов подшипников и приводов горного оборудования. В зависимости от типа машин и схемы смазывания доля таких отказов изменяется от порядка 30–40% для стационарных агрегатов с циркуляционными системами до 60–70% для мобильной техники с централизованным консистентным смазыванием.

2. Для автоматических централизованных систем с пластичными смазочными материалами ключевой проблемой является неравномерность подачи по каналам дозаторов, достигающая при серийном исполнении порядка ± 25 –30%. Применение селективной сборки питателей и контроля фактических расходов позволяет снизить разброс до уровня около ± 10 –15%, что обеспечивает надежное смазывание ресурсопределяющих подшипников и сопряжений.

3. Конструктивно упрощенные масляные баки циркуляционных смазочных систем (малый объем, отсутствие перегородок и успокоительных устройств) не обеспечивают требуемого времени пребывания масла в нем, способствуют аэрации и переносу загрязнений к всасывающему патрубку. Для тяжелого горного оборудования целесообразно ориентироваться на объем бака, соответствующий 5–10-минутным расходам насоса, и реализовывать компоновку, обеспечивающую осаждение частиц и дегазацию масла.

4. Совместное совершенствование дозирующих устройств и масляных баков, дополненное мониторингом расхода, давления, температуры и состояния смазочного материала, позволяет снизить долю отказов, связанных со смазыванием: устранение выраженной неравномерности подачи обеспечивает снижение остаточного ресурса подшипников на 40–60% (при полном устранении отка-

за дозирующих элементов), а снижение вспенивания и аэрации масла в циркуляционных системах — на 30–50% (см. табл. 5). Таким образом, комплексная реализация предложенных мер создает реальный резерв увеличения межремонтных интервалов критически нагруженных агрегатов.

5. Обобщение многолетнего эксплуатационного опыта ООО «Техпартнер» по обслуживанию централизованных и циркуляционных систем смазывания

карьерной техники и печных агрегатов подтверждает, что соблюдение требований к конструкции дозаторов, масляных баков и организации мониторинга параметров смазки позволяет существенно снизить долю отказов узлов трения и увеличить межремонтные интервалы. Полученные в настоящей работе рекомендации согласуются с ранее опубликованными результатами авторов по централизованным системам смазывания и мониторингу ресурса трансмиссий [11, 13].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гришин И. А., Великанов В. С., Назаров О. В., Дерина Н. В. О возможности использования метода локальной аппроксимации для прогноза нерегулярных временных рядов отказов горнотранспортных машин // Уголь. — 2022. — № 3 (1152). — С. 84–89. DOI: 10.18796/0041-5790-2022-3-84-89.
2. Рахутин М. Г., Чан В. Х., Кривенко А. Е., Занг К. К. Влияние технического состояния главных насосов гидравлического экскаватора на расход топлива // Горные науки и технологии. — 2025. — Т. 10. — № 1. — С. 67–74. DOI: 10.17073/2500-0632-2024-01-179.
3. Хамидов О. У., Шибанов Д. А., Шишкин П. В., Колпаков В. О. Эффективность применения экскаваторов на карьерах Узбекистана // Горная промышленность. — 2024. — № 5. — С. 135–142. DOI: 10.30686/1609-9192-2024-5-135-142.
4. Zhu S., Zhang X., Wang D., Wang J. Mixed turbulent lubrication analysis of worn journal bearing with end oil supply // Tribology International. 2024, no. 193, pp. 1–16. DOI: 10.1016/j.triboint.2024.109380.
5. Piechowski M., Wyczółkowski R., Paszkowski W., Meller A. Improving the efficiency of greasing operations with the lubrication management support system: a case study // IFAC-PapersOnLine. 2024, vol. 58, no. 8, pp. 228–233. DOI: 10.1016/j.ifacol.2024.08.125.
6. Zhou P., Ling J., Zhao R. Modeling with experimental validation of power loss in high-speed rolling bearings with oil-jet lubrication for helicopter transmission systems // Tribology International. 2026, vol. 218, pp. 1–12. DOI: 10.1016/j.triboint.2026.111762.
7. Semykina A. S., Zagorodniy N. A., Novikov I. A., Novikov A. N. Main directions of improving the maintenance and repair of vehicle units in the Far North // Transportation Research Procedia. 2021, vol. 57, pp. 611–616. DOI: 10.1016/j.trpro.2021.09.090.
8. Лагунова Ю. А., Майоров С. А., Боярских Г. А. Статистический анализ напряженно-деформированного состояния подшипника щековой дробилки // Известия УГГУ. — 2020. — Т. 2. — № 58. — С. 159–171. DOI: 10.21440/2307-2091-2020-2-159-171.
9. Yungmeister D. A., Ivanov S. E., Isaev A. I. Calculation of parameters of technological equipment for deep-sea mining // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018, vol. 327, no. 2, pp. 1–6. DOI: 10.1088/1757-899X/327/2/022050.
10. Глазьев М. В., Бажин В. Ю., Глазьева И. А. Оценка влияния добавки микрокремнезема на свойства огнеупорных материалов для сталеразливочных ковшей // Черные металлы. — 2025. — № 6. — С. 22–28. DOI: 10.17580/chm.2025.06.04.
11. Иванов С. Л., Фокин А. С., Потапенко В. С., Подхалюзин С. П. Мониторинг состояния, прогнозирование и повышение остаточного ресурса трансмиссии и опорных подшипников трубчатых печей // Записки Горного института. — 2011. — Т. 192. — С. 111–114.
12. Адмакин М. А., Адмакина О. Н., Тимофеев Д. Ю., Халимоненко А. Д. Деформационные процессы при высокоскоростном фрезеровании алюминиевых сплавов // Цветные металлы. — 2025. — № 3. — С. 75–80. DOI: 10.17580/tsm.2025.03.11.
13. Майоров С. А., Лагунова Ю. А. Анализ напряженно-деформированного состояния подшипника // Известия вузов. Горный журнал. — 2020. — № 3. — С. 107–117. DOI: 10.21440/0536-1028-2020-3-107-117.

14. Alshaer B. J., Lankarani M. L. Multiple lubricated joints with long and short bearings in multi-body mechanical systems — Modeling, simulation, and performance analysis // *Mechanism and Machine Theory*. 2024, vol. 203, pp. 1–11. DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2024.105815.
15. Журавлев А. Г., Глебов И. А., Черных В. В. Закономерности изменения энергоемкости транспортирования горной массы транспортом глубоких карьеров // *Горные науки и технологии*. — 2023. — Т. 8. — № 1. — С. 68–77. DOI: 10.17073/2500-0632-2022-09-12.
16. Ardah S., Profito F. J., Dini D. A comprehensive review and trends in lubrication modeling // *Advances in Colloid and Interface Science*. 2025, vol. 342, pp. 1–33. DOI: 10.1016/j.cis.2025.103492.
17. Хакулов В. А., Шаповалов В. А., Игнатов В. Н., Карпова Ж. В., Игнатов М. В., Ногоров И. А. Обоснование рациональной области и технологии применения гидравлических экскаваторов на открытых горных работах // *Горные науки и технологии*. — 2025. — Т. 10. — № 4. — С. 338–345. DOI: 10.17073/2500-0632-2025-09-460.
18. 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.
19. Stefan-Henningsen E., Roberts N., Kiani A. Enhancing tribological performance: A comprehensive review of graphene-based additives in lubricating greases // *Results in Engineering*. 2025, vol. 25, pp. 1–16. DOI: 10.1016/j.rineng.2025.104551.
20. Semykina A. S., Zagorodniy N. A., Novikov A. N. Study of the effectiveness of the organization of the system of maintenance and repair of quarry transport of mining and processing plants // *Transportation Research Procedia*. 2022, vol. 63, pp. 983–989. DOI: 10.1016/j.trpro.2022.06.097.
21. Zheng K., Zhang X., Du K., Li S., Zhang J., Wu W., Xu B., Yang H., Zhang C. Oil film mixed lubrication of heavy-load friction pairs: Theoretical modeling, solution methods, and applications // *Tribology International*. 2025, vol. 216, pp. 1–25.
22. Губарев А. В., Губарева В. В. Гидрогазодинамика. — Белгород: Изд-во БГТУ, 2025. — 188 с.
23. Xu X., Liao X., Zhou T., He Z., Hu H. Vibration-based identification of lubrication starved bearing using spectral centroid indicator combined with minimum entropy deconvolution // *Measurement*. 2024, vol. 226, pp. 1–11. DOI: 10.1016/j.measurement.2024.114156.
24. Zhang R., Yu Y., Ou S., Hu L., Cao B., Xie L., Ma B. Research on the stress response characteristics of the crank-connecting rod mechanism under lubrication failure and auxiliary equipment malfunction // *Engineering Failure Analysis*. 2025, vol. 179, pp. 1–24. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2025.109751.
25. Taşgın Ya., Kahraman G. Crack failure in hydrodynamically lubricated bearings: A case study hydraulic turbine // *Engineering Failure Analysis*. 2021, vol. 121, pp. 105–123. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2020.105123.
26. Ouyang L., Huang H., Yang X. An intelligent lubricating oil quality detector integrating computer technology // *Procedia Computer Science*. 2024, vol. 243, pp. 819–825. DOI: 10.1016/j.procs.2024.09.098.
27. Neves M. D. M., Andrade A. H. P., Silva D. N. Analysis of the criticality of flaws found in trunnion of grinding ball mills used in mining plants // *Engineering Failure Analysis*. 2016, vol. 61, pp. 28–36. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2015.07.037.
28. Леванов И. Г., Задорожная Е. А., Мухортов И. В., Никитин Д. Н. Моделирование гидродинамических подшипников скольжения с учетом индивидуальных противоизносных свойств смазочных материалов // *Вестник Южно-Уральского государственного университета*. — 2021. — Т. 21. — № 1. — С. 14–28. DOI: 10.14529/engin210102.
29. Peng H., Chen Y., Shangguan L., Cheng R., Li Y., Yang C. Multi-objective-based intelligent lubrication system performance evaluation technology for construction machinery // *Applied Sciences*. 2023, vol. 13, no. 21, pp. 1–19. DOI: 10.3390/app132111768.
30. Ehler D. Eliminating risks in bearing lubrication // *World Pumps*. 2012, vol. 7, pp. 24, 26, 28, 30, 31. DOI: 10.1016/S0262-1762(12)70153-0.
31. Crump W. J. J. Centralized lubrication for high temperature applications // *Tribology*. 1972, vol. 5, no. 2, pp. 78–80. DOI: 10.1016/0041-2678(72)90122-4.
32. Bugarić U., Jovanović R., Tanasijević M., Djenadić S. Prediction of technical systems availability using the simulation models based on the AI techniques and statistical methods. A case study: Bucket wheel excavator // *Results in Engineering*. 2025, vol. 27, pp. 1–16. DOI: 10.1016/j.rineng.2025.106692.
33. Yu G., Zhao Y., Fu Z., Chen Z. Application of back propagation neural network in the analysis of isothermal elastohydrodynamic lubrication // *Tribology International*. 2024, vol. 198, pp. 1–9. DOI: 10.1016/j.triboint.2024.109883.

34. Zhang T., Li R., Jin Y., Ouyang W., Zhu H., Dong X., Wei D., Bai Y. Structural health monitoring of water-lubricated stern bearing systems based on digital twins // *Ocean Engineering*. 2025, vol. 345, pp. 1 – 13. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2025.123844.

35. Подхалюзин С. П., Ондриков А. И., Селезнев М. С. Патент РФ № 2024101958, 26.06.2024. Гидравлический масляный бак. 2024. Бюл. № 18.

36. Федотов Е. С., Шевцов Ю. Д., Курашев И. В. Математическая модель расчета необходимого объема смазывающего материала в системе смазки энергетических установок // *Современные проблемы теории машин*. — 2022. — № 13. — С. 46 – 49. DOI: 10.26160/2307-342X-2022-13-46-49.

37. Бондаренко Ю. А., Бестужева О. В., Баранов Д. С., Романович А. А. Прогнозирование остаточного ресурса шаровых трубных мельниц // *Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова*. — 2024. — № 11. — С. 132 – 141. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-11-132-141.

38. Вальнев В. В., Котелева Н. И. К вопросу об автоматизации технического обслуживания и ремонта промышленного оборудования // *Современные наукоемкие технологии*. — 2024. — Т. 5. — № 2. — С. 276 – 283. DOI: 10.17513/snt.40040.

39. Котелева Н. И., Вальнев В. В., Симаков А. С., Ширази М. М. Цифровая трансформация процесса технического обслуживания и ремонта оборудования для построения промышленной метавселенной // *Записки Горного института*. — 2025. — Т. 275. — С. 30 – 41.

40. Liu K., Shi X., Wang D., Feng Y., Jian Y., Li W. A method for the dynamic characteristic analysis of a rotor-rolling bearing system influenced by elastohydrodynamic lubrication // *Journal of Sound and Vibration*. 2025, vol. 608, pp. 1 – 19. DOI: 10.1016/j.jsv.2025.119075.

41. Tian Y., Zhang C., Yang L. Analysis of the longitudinal coupled dynamic characteristics of shaft-shell system considering the lubrication of thrust bearing // *European Journal of Mechanics – A/Solids*. 2025, vol. 113, pp. 1 – 22. DOI: 10.1016/j.euromechsol.2025.105726. **ПИАБ**

REFERENCES

1. Grishin I. A., Velikanov V. S., Nazarov O. V., Derina N. V. On the possibility of using the local approximation method to predict irregular time series of failures of mining and transport vehicles. *Ugol'*. 2022, no. 3 (1152), pp. 84 – 89. [In Russ]. DOI: 10.18796/0041-5790-2022-3-84-89.

2. Rakhutin M. G., Tran V. H., Krivenko A. E., Giang Q. Kh. Impact of the technical condition of main pumps on fuel consumption in a hydraulic excavator. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2025, vol. 10, no. 1, pp. 67 – 74. [In Russ]. DOI: 10.17073/2500-0632-2024-01-179.

3. Khamidov O. U., Shibanov D. A., Shishkin P. V., Kolpakov V. O. Efficiency of excavators application in open pit mines of Uzbekistan. *Russian Mining Industry Journal*. 2024, no. 5, pp. 135 – 142. [In Russ]. DOI: 10.30686/1609-9192-2024-5-135-142.

4. Zhu S., Zhang X., Wang D., Wang J. Mixed turbulent lubrication analysis of worn journal bearing with end oil supply. *Tribology International*. 2024, no. 193, pp. 1 – 16. DOI: 10.1016/j.triboint.2024.109380.

5. Piechowski M., Wyczółkowski R., Paszkowski W., Meller A. Improving the efficiency of greasing operations with the lubrication management support system: a case study. *IFAC-PapersOnLine*. 2024, vol. 58, no. 8, pp. 228 – 233. DOI: 10.1016/j.ifacol.2024.08.125.

6. Zhou P., Ling J., Zhao R. Modeling with experimental validation of power loss in high-speed rolling bearings with oil-jet lubrication for helicopter transmission systems. *Tribology International*. 2026, vol. 218, pp. 1 – 12. DOI: 10.1016/j.triboint.2026.111762.

7. Semykina A. S., Zagorodniy N. A., Novikov I. A., Novikov A. N. Main directions of improving the maintenance and repair of vehicle units in the Far North. *Transportation Research Procedia*. 2021, vol. 57, pp. 611 – 616. DOI: 10.1016/j.trpro.2021.09.090.

8. Lagunova Yu. A., Mayorov S. A., Boyarskikh G. A. Statistical analysis of the stress-strain state of a jaw crusher bearing. *News of the Ural State Mining University*. 2020, vol. 2, no. 58, pp. 159 – 171. [In Russ]. DOI: 10.21440/2307-2091-2020-2-159-171.

9. Yungmeister D. A., Ivanov S. E., Isaev A. I. Calculation of parameters of technological equipment for deep-sea mining. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018, vol. 327, no. 2, pp. 1 – 6. DOI: 10.1088/1757-899X/327/2/022050.

10. Glazyev M. V., Bazhin V. Y., Glazyeva I. A. Assessment of the effect of microsilica additive on the properties of refractory materials for steelmaking ladles. *Chernye Metally*. 2025, vol. 6, pp. 22 – 28. [In Russ]. DOI: 10.17580/chm.2025.06.04.

11. Ivanov S. L., Fokin A. S., Potapenko V. S., Podkhalyuzin S. P. Monitoring the condition, forecasting and increasing the residual life of transmission and support bearings of tubular furnaces. *Journal of Mining Institute*. 2011, vol. 192, pp. 111 – 114. [In Russ].

12. Admakina M. A., Admakina O. N., Timofeev D. Yu., Khalimonenko A. D. Deformation processes during high-speed milling of aluminum alloys. *Tsvetnye Metally*. 2025, no. 3, pp. 75 – 80. [In Russ]. DOI: 10.17580/tsm.2025.03.11.
13. Maierov S. A., Lagunova Iu. A. Analysis of the stressed-deformed condition of the bearing installed. *Minerals and Mining Engineering*. 2020, no. 3, pp. 107 – 117. [In Russ]. DOI: 10.21440/0536-1028-2020-3-107-117.
14. Alshaer B. J., Lankarani M. L. Multiple lubricated joints with long and short bearings in multi-body mechanical systems – Modeling, simulation, and performance analysis. *Mechanism and Machine Theory*. 2024, vol. 203, pp. 1 – 11. DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2024.105815.
15. Zhuravlev A. G., Glebov I. A., Chernykh V. V. Behaviour pattern of rock mass haulage energy intensity in deep pits. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2023, vol. 8, no. 1, pp. 68 – 77. [In Russ]. DOI: 10.17073/2500-0632-2022-09-12.
16. Ardah S., Profito F. J., Dini D. A comprehensive review and trends in lubrication modeling. *Advances in Colloid and Interface Science*. 2025, vol. 342, pp. 1 – 33. DOI: 10.1016/j.cis.2025.103492.
17. Khakulov V. A., Shapovalov V. A., Ignatov V. N., Karpova Zh. V., Ignatov M. V., Nogerov I. A. Justification of the rational scope and technology for the use of hydraulic excavators in surface mining. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2025, vol. 10, no. 4, pp. 338 – 345. [In Russ]. DOI: 10.17073/2500-0632-2025-09-460.
18. 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.
19. Stefan-Henningsen E., Roberts N., Kiani A. Enhancing tribological performance: A comprehensive review of graphene-based additives in lubricating greases. *Results in Engineering*. 2025, vol. 25, pp. 1 – 16. DOI: 10.1016/j.rineng.2025.104551.
20. Semykina A. S., Zagorodniy N. A., Novikov A. N. Study of the effectiveness of the organization of the system of maintenance and repair of quarry transport of mining and processing plants. *Transportation Research Procedia*. 2022, vol. 63, pp. 983 – 989. DOI: 10.1016/j.trpro.2022.06.097.
21. Zheng K., Zhang X., Du K., Li S., Zhang J., Wu W., Xu B., Yang H., Zhang C. Oil film mixed lubrication of heavy-load friction pairs: Theoretical modeling, solution methods, and applications. *Tribology International*. 2025, vol. 216, pp. 1 – 25.
22. Gubarev A. V., Gubareva V. V. *Gidrogazodinamika* [Hydrogasdynamics], Belgorod, Izd-vo BGTU, 2025, 188 p.
23. Xu X., Liao X., Zhou T., He Z., Hu H. Vibration-based identification of lubrication starved bearing using spectral centroid indicator combined with minimum entropy deconvolution. *Measurement*. 2024, vol. 226, pp. 1 – 11. DOI: 10.1016/j.measurement.2024.114156.
24. Zhang R., Yu Y., Ou S., Hu L., Cao B., Xie L., Ma B. Research on the stress response characteristics of the crank-connecting rod mechanism under lubrication failure and auxiliary equipment malfunction. *Engineering Failure Analysis*. 2025, vol. 179, pp. 1 – 24. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2025.109751.
25. Taşgın Ya., Kahraman G. Crack failure in hydrodynamically lubricated bearings: A case study hydraulic turbine. *Engineering Failure Analysis*. 2021, vol. 121, pp. 105 – 123. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2020.105123.
26. Ouyang L., Huang H., Yang X. An intelligent lubricating oil quality detector integrating computer technology. *Procedia Computer Science*. 2024, vol. 243, pp. 819 – 825. DOI: 10.1016/j.procs.2024.09.098.
27. Neves M. D. M., Andrade A. H. P., Silva D. N. Analysis of the criticality of flaws found in trunnion of grinding ball mills used in mining plants. *Engineering Failure Analysis*. 2016, vol. 61, pp. 28 – 36. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2015.07.037.
28. Levanov I. G., Zadorozhnaya E. A., Mukhortov I. V., Nikitin D. N. Modeling of hydrodynamic plain bearings taking into account the individual anti-wear properties of lubricants. *Bulletin of the South Ural State University*. 2021, vol. 21, no. 1, pp. 14 – 28. [In Russ]. DOI: 10.14529/engin210102.
29. Peng H., Chen Y., Shangquan L., Cheng R., Li Y., Yang C. Multi-objective-based intelligent lubrication system performance evaluation technology for construction machinery. *Applied Sciences*. 2023, vol. 13, no. 21, pp. 1 – 19. DOI: 10.3390/app132111768.
30. Ehler D. Eliminating risks in bearing lubrication. *World Pumps*. 2012, vol. 7, pp. 24, 26, 28, 30, 31. DOI: 10.1016/S0262-1762(12)70153-0.
31. Crump W. J. J. Centralized lubrication for high temperature applications. *Tribology*. 1972, vol. 5, no. 2, pp. 78 – 80. DOI: 10.1016/0041-2678(72)90122-4.
32. Bugarić U., Jovanović R., Tanasijević M., Djenadić S. Prediction of technical systems availability using the simulation models based on the AI techniques and statistical methods. A case study: Bucket wheel excavator. *Results in Engineering*. 2025, vol. 27, pp. 1 – 16. DOI: 10.1016/j.rineng.2025.106692.

33. Yu G., Zhao Y., Fu Z., Chen Z. Application of back propagation neural network in the analysis of isothermal elastohydrodynamic lubrication. *Tribology International*. 2024, vol. 198, pp. 1–9. DOI: 10.1016/j.triboint.2024.109883.

34. Zhang T., Li R., Jin Y., Ouyang W., Zhu H., Dong X., Wei D., Bai Y. Structural health monitoring of water-lubricated stern bearing systems based on digital twins. *Ocean Engineering*. 2025, vol. 345, pp. 1–13. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2025.123844.

35. Podkhalyuzin S. P., Ondrikov A. I., Seleznev M. S. *Patent RU 2024101958*, 26.06.2024. [In Russ].

36. Fedotov E. S., Shevtsov Yu. D., Kurashev I. V. Mathematical model for calculating the required volume of lubricant in the lubrication system of power plants. *Modern Problems of Machine Theory*. 2022, no. 13, pp. 46–49. [In Russ]. DOI: 10.26160/2307-342X-2022-13-46-49.

37. Bondarenko Yu. A., Bestuzheva O. V., Baranov D. S., Romanovich A. A. Prediction of the residual life of ball tube mills. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2024, no. 11, pp. 132–141. [In Russ]. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-11-132-141.

38. Valnev V. V., Koteleva N. I. On the issue of automation of maintenance and repair of industrial equipment. *Modern High-Tech Technologies*. 2024, vol. 5, no. 2, pp. 276–283. [In Russ]. DOI: 10.17513/snt.40040.

39. Koteleva N. I., Valnev V. V., Simakov A. S., Shirazi M. M. Digital transformation of industrial machinery repair and maintenance to build an industrial metaverse. *Journal of Mining Institute*. 2025, vol. 275, pp. 30–41. [In Russ].

40. Liu K., Shi X., Wang D., Feng Y., Jian Y., Li W. A method for the dynamic characteristic analysis of a rotor-rolling bearing system influenced by elastohydrodynamic lubrication. *Journal of Sound and Vibration*. 2025, vol. 608, pp. 1–19. DOI: 10.1016/j.jsv.2025.119075.

41. Tian Y., Zhang C., Yang L. Analysis of the longitudinal coupled dynamic characteristics of shaft-shell system considering the lubrication of thrust bearing. *European Journal of Mechanics – A/Solids*. 2025, vol. 113, pp. 1–22. DOI: 10.1016/j.euromechsol.2025.105726.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Иванова Евгения Сергеевна¹ — аспирант,

e-mail: s255079@stud.spmi.ru, ORCID ID: 0009-0001-9605-3662,

Иванов Сергей Леонидович¹ — д-р техн. наук, профессор, профессор,

e-mail: Ivanov_SL@pers.spmi.ru, ORCID ID: 0000-0002-7014-2464,

Корогодин Артур Сергеевич¹ — канд. техн. наук, ассистент кафедры,

e-mail: Korogodin_AS@pers.spmi.ru, ORCID ID: 0000-0002-3398-6342,

Плещинский Вячеслав Алексеевич¹ — канд. техн. наук, доцент,

e-mail: Plaschinskiy_VA@pers.spmi.ru, ORCID ID: 0000-0003-0326-4514,

¹ Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II.

Для контактов: Иванова Е.С., e-mail: s255079@stud.spmi.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

E.S. Ivanova¹, Graduate Student,

e-mail: s255079@stud.spmi.ru, ORCID ID: 0009-0001-9605-3662,

S.L. Ivanov¹, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Professor,

e-mail: Ivanov_SL@pers.spmi.ru, ORCID ID: 0000-0002-7014-2464,

A.S. Korogodin¹, Cand. Sci. (Eng.), Assistant of Chair,

e-mail: Korogodin_AS@pers.spmi.ru, ORCID ID: 0000-0002-3398-6342,

V.A. Plaschinsky¹, Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor,

e-mail: Plaschinskiy_VA@pers.spmi.ru, ORCID ID: 0000-0003-0326-4514,

¹ Empress Catherine II Saint-Petersburg Mining University,

199106, Saint-Petersburg, Russia.

Corresponding author: E.S. Ivanova, e-mail: s255079@stud.spmi.ru.

Получена редакцией 10.05.2026; получена после рецензии 29.06.2026; принята к печати 10.10.2026.

Received by the editors 10.05.2026; received after the review 29.06.2026; accepted for printing 10.10.2026.