УДК 622.271:621.892

Колпаков Владимир Олегович, аспирант; Шибанов Даниил Александрович, доцент, к.т.н. (Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург)
Vladimir O. Kolpakov V, postgraduate student; Shibanov D. Aleksandrovich, docent, candidate of engineering sciences (Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg)

ВЛИЯНИЕ ОБЪЁМА И ИНТЕРВАЛОВ ПОДАЧИ СМАЗОЧНОГО МАТЕРИАЛА НА ИНТЕНСИВНОСТЬ РАСХОДОВАНИЯ РЕСУРСА ПОДШИПНИКОВ СКОЛЬЖЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО КАРЬЕРНОГО ЭКСКАВАТОРА

INFLUENCE OF THE VOLUME AND INTERVALS OF LUBRICANT SUPPLY ON THE RESOURCE CONSUMPTION RATE OF PLAIN BEARINGS OF AN ELECTRIC MINING EXCAVATOR

Аннотация.

Рассмотрено влияние объёма и интервалов подачи смазочного материала автоматической централизованной системой смазывания на интенсивность расходования ресурса подшипников скольжения карьерного экскаватора. Предложен подход к адаптации режимов смазывания к фактическим режимам нагружения машины.

Abstract.

The effect of the volume and intervals of lubricant supply by an automatic centralized lubrication system on the resource consumption rate of mining excavator plain bearings is considered. Adaptation of lubrication modes to the actual machine loading is proposed.

Эксплуатационная практика показывает, что 50–70 % отказов горной машины приходится на механическую часть, а долговечность экскаватора определяет степень изнашивания его ресурсоопределяющих узлов, значительную долю среди которых составляют подшипники [1, 7]. Современные одноковшовые экскаваторы повсеместно оснащаются автоматическими централизованными системами смазывания (АЦСС), подающими пластичный смазочный материал к десяткам точек смазывания [1, 2]. Регламентное дозирование и интервалы подачи смазочного материала рассчитываются изготовителем для нормальных условий эксплуатации, что зачастую не соответствует фактическим режимам нагружения машины.

Работа электрического карьерного экскаватора в тяжёлых горно-геологических условиях: крепкие породы (f = 15–18), несоответствующих гранулометрический состав, перегрузочные режимы, отрицательные темпера-

туры до –50 °С, приводит к систематическому дефициту смазочного материала в наиболее нагруженных парах трения в наиболее ответственные периоды их работы [3, 4].

Парк карьерных экскаваторов типа ЭКГ железорудного предприятия регионов с холодным климатом насчитывает более трех десятков машин, а структура их простоев характерна для отрасли: 61 % приходится на мероприятия планового технического обслуживания и ремонта и 39 % – на аварийные простои [7]. Существенная часть простоев связана с состоянием узлов трения, и как следствие – с качеством их смазывания.

Задача исследования: проанализировать режимы смазывания подшипников скольжения и условия их работы на карьерном экскаваторе; обосновать зависимость интенсивности расходования ресурса сопряжений от объёма и интервалов подачи смазочного материала.

Режимы смазывания подшипников скольжения

В общем случае работоспособность подшипника скольжения определяется режимом смазывания. Для экскаваторов типа ЭКГ – это граничные режимы трения при малых скоростях скольжение с необходимостью выноса продуктов изнашивания и абразивной пыли. Классификация режимов строится на кривой Штрибека, а обобщающим параметром служит отношение толщины смазочной плёнки к приведённой шероховатости поверхностей [1]:

$$\lambda = \frac{h}{R_a}, \quad (1)$$

где h – толщина плёнки смазочного материала, мм; R_a – приведённая шероховатость поверхностей, мм. При $\lambda > 2–3$ реализуется жидкостное трение: внешняя нагрузка полностью уравновешивается гидродинамическими давлениями в смазочном слое, поверхности разделены, изнашивание практически отсутствует [6]. При смешанном режиме ($\lambda \approx 1–2$) нагрузка частично воспринимается микронеровностями, интенсивность изнашивания низкая или умеренная, данный режим типичен для подшипников качения опорно-поворотного устройства и роликового круга, работающих при высоких нагрузках и малых скоростях [1].

Граничный режим ($\lambda < 1$) возникает при малых скоростях и высоких нагрузках, типичный для седлового подшипника и опорных роликов электрического карьерного экскаватора. Толщина плёнки меньше шероховатости поверхностей, несущая способность контакта здесь обеспечивается не объёмной вязкостью, а свойствами пограничных слоёв адсорбционного и химического происхождения [5]. Для экскаватора этот режим является основным рабочим: он неизбежен в зацеплении зубчатых передач и возникает в любой нагруженной паре трения в моменты пуска и остановки, когда нагрузка велика, а скорость стремится к нулю [1]. Количественным критерием критичности режима служит его продолжительность: при доле гранич-

ного режима свыше 25 % времени работы пара трения переходит в предотказное состояние [6]. Полное исчерпание смазочного материала в зоне пятна контакта переводит пару трения в режим задира. Граница этого перехода характеризуется нагрузкой сваривания, а работоспособность в смешанном режиме – критической нагрузкой и диаметром пятна износа [1]. Характеристика режимов применительно к узлам экскаватора приведена в таблице 1.

Таблица 1 – Режимы смазывания и их проявление в узлах карьерного экскаватора

Режим смазывания	*Условия возникновения*	*Проявление в узлах экскаватора*
Жидкостное (гидродинамическое, эластогидродинамическое)	$\lambda > 2–3$: достаточные скорость и вязкость, умеренная нагрузка	Подшипники валов редукторов при установившемся вращении; износ практически отсутствует [1, 6]
Смешанное	$\lambda \approx 1–2$: плёнка сопоставима с шероховатостью	Подшипники качения опорно-поворотного устройства, роликового круга; износ низкий или умеренный [1]
Граничное	$\lambda < 1$: малые скорости при высоких нагрузках, пуски и остановки, перегрузки	Пальцы и втулки узлов рабочего оборудования, седловой подшипник, зацепление открытых передач; значительный износ; доля свыше 25 % времени – предотказное состояние [1, 6]
Сухое трение (задир)	Смазочный материал полностью отсутствует в зоне контакта (превышена нагрузка сваривания)	Аварийные случаи при отсутствии смазочного матриала; отказ системы смазывания [1]

Сложнонагруженные подшипники скольжения испытывают изменяющиеся по величине и направлению механические нагрузки в сочетании со значительным тепловым нагревом [6]. На экскаваторе к этому добавляется цикличность работы: за каждый рабочий цикл пары узлы рабочего оборудования последовательно проходят внедрение ковша в забой с пиковыми усилиями, подъём и поворот с породой, разгрузку и холостой возврат, а каждый пуск механизма сопровождается выходом сопряжений в граничный режим трения [1, 3].

Основным видом механического изнашивания деталей карьерных экскаваторов является абразивное изнашивание высокотвёрдыми частицами абразива: концентрация активных абразивных частиц в смазочном

метриалее свыше 0,1 % по массе является предельной с точки зрения предотказного состояния подшипника [6, 10]. В низкотемпературных условиях эксплуатации критическим становится ухудшение прокачиваемости густого смазочного материала по магистралям АЦСС, приводящее к неполной подаче к удалённым точкам смазывания в пусковые периоды [1, 2]. При этом, согласно классификации факторов работоспособности карьерных экскаваторов, конструктивные и технологические факторы задают лишь исходный уровень надёжности пар трения, а решающими в эксплуатации оказывается выполнение регламента ремонтных работ, своевременное и качественное смазывание, то есть факторы, управляемые на уровне предприятия [10].

К условиям работы следует отнести и организационно-технологические факторы. Интенсивность расходования ресурса однотипных машин в идентичных горно-геологических условиях различается почти вдвое в зависимости от организации горных работ и мероприятий технического обслуживания [7]:

- Коэффициент деградации по фактору управления (1,2–1,9);
- Коэффициент технического возраста парка (1 – 1,9);
- Коэффициент климатических условий (1,01–1,11).

Квалификация машиниста определяет частоту перегрузочных режимов и срабатываний защитных отсечек приводов [3, 11]. Тем самым нагруженность подшипников скольжения, а следовательно, и потребность их в смазочном материале являются переменными во времени величинами даже для одной и той же машины, что принципиально несовместимо со статичными регламентными нормами смазывания.

АЦСС обеспечивает дозированную подачу густого смазочного материала к точкам смазывания без участия обслуживающего персонала. Эффективность централизованных систем подтверждена опытом их применения на технике Caterpillar, Komatsu и российских производителей. На экскаваторах ЭКГ-18Р/ЭКГ-20К применяются системы SKF с автоматическими лубрикаторами, способными вести дозированную подачу непрерывно, в режиме 24 часа в сутки [8].

При наличии АЦСС, предъявляются высокие требования к качеству смазочного материала. Смазочный материал должен обладать одновременно адгезией, водостойкостью и хорошей прокачиваемостью, причём улучшение одних свойств может ухудшать другие [1], чистота смазочного материала так же критически важна, плунжерные пары распределителей притёрты с зазором 2–3 мкм, и попадание даже мелких абразивных частиц приводит к их заклиниванию [1, 8]. В большинстве случаев одна система обслуживает одним смазочным материалом различные типы пар трения: подшипники скольжения (пальцы и втулки), открытые и закрытые зубчатые передачи, подшипники качения опорно-поворотного устройства, направляющие.

При отказе АЦСС не останавливают машину немедленно, следовательно все обслуживаемые пары трения переходят в режим ускоренного изнашивания, что делает надёжность самой системы смазываниясамостоятельным фактором безотказности экскаватора.

Влияние объёма и интервалов подачи на ресурс подшипников

Объём и интервалы подачи смазочного материала влияют на ресурс подшипников разнонаправленно. Недостаточная доза или увеличенный интервал приводят к истощению смазочного материала в контакте, росту доли граничного режима сверх критических 25 % времени и ускоренному изнашиванию вплоть до предотказного состояния. Избыточная подача неоправданно увеличивает расход смазочного материала и трудозатраты, а в закрытых узлах вызывает перегрев и вымывание плёнки. Поскольку интенсивность расходования ресурса машины определяется фактическими условиями эксплуатации, статичность регламентных норм образует резерв ресурса: в тяжёлых условиях нормативные интервалы запаздывают, а в щадящих – избыточны.

Для устранения рассогласования предлагается корректировать режимы смазывания по фактической интенсивности расходования ресурса. Обобщённый коэффициент условий эксплуатации определяется произведением

$$K_{\Sigma} = k_p * ПK_{д,j} \quad (2)$$

где k_p – коэффициент расходования ресурса, вычисляемый по фактической нагруженности приводов (регистрация токов и частоты срабатывания защитных отсечек); $K_{д,j}$ – коэффициенты деградационных факторов (технический возраст, организация работ, климат). Уточнённый интервал смазывания

$$T' = \frac{T_н}{K_{\Sigma}} \quad (3)$$

где $T_н$ – нормативная периодичность смазывания по регламентной документации, ч. Дозы и интервалы автоматического контура перенастраиваются при этом програмно, без изменения оборудования [4].

Корректировка периодичности основных мероприятий по смазыванию применительно к тяжёлым условиям эксплуатации приведена в таблице 3. Важно подчеркнуть двусторонний характер зависимости: при неизменном интервале увеличение дозы повышает запас смазочной плёнки, но не защищает от её истощения к концу периода; при неизменной дозе сокращение интервала чаще восполняет материал в контакте, но увеличивает суммарный расход. Рациональные режимы достигаются согласованным изменением обоих параметров по формулам (2)–(3) с контролем фактического состояния пары трения [1, 3].

Таблица 3 – Корректировка периодичности смазывания по фактическим условиям эксплуатации [3, 7]

Условия эксплуатации	*Обобщённый коэффициент* K_Σ	*Поправка к интервалу смазывания*
Нормальные (базовые) k_1, k_2, k_3	K_Σ = 1,0	$T' = T_н$
Крепкие породы (f = 15–18), перегрузочные режимы $k_{1.1}$	1,2–1,3	Сокращение на 17–23 %
Зимний период (до –50 °C) $k_{1.2}$	1,01–1,11 (климатический фактор)	Сезонная корректировка, смена сорта смазочного материала
Возрастной парк (большая суммарная наработка)	до 1,9	Индивидуальный график, учащённый контроль состояния
Рациональная траектория отработки забоя	0,8	Обоснованное расширение до +25 %

При скорости напора $v_н$=0,55 $\frac{м}{с}$ [4]. Опорный ролик (диаметр $D_р$=0,35 м; диаметр оси d_0=0,19 м) перекатывается по балке рукояти без проскальзывания, угловая скорость и частота вращения при нагрузке более 50т. составляют:

$$n_р = \frac{60 v_н}{\pi_р} \approx 30 \frac{об}{мин}.$$

Скорость скольжения в подшипнике скольжения оси опорного ролика:

$$v_{ск} = \frac{d_0 \omega_р}{2} \approx 0{,}3 \frac{м}{с}$$

Реализация адаптивных режимов требует регулярной информации о состоянии пар трения и качества смазочного материала. Для сложнонагруженных подшипников скольжения разработана расчётно-экспериментальная методика определения предотказного состояния, включающая предельные значения зазора, вязкости масла, овальности шейки вала и вкладышей, площади выкрашивания и концентрации абразивных частиц [6]. Отказом узла трения является состояние, при котором внешняя нагрузка перестаёт уравновешиваться давлением в смазочном слое, – то есть состояние пары трения есть прямое следствие состояния его смазывания. Практическими методами контроля служат регистрация токов приводов и срабатываний отсечек, периодическое акустико-эмиссионное диагностирование трансмиссий, отбор и анализ проб масла, а для самой АЦСС – контроль давления в магистрали, срабатывания распределителей, уровня и чистоты смазочного материала.

В сочетании со штатными средствами контроля АЦСС это образует диагностическую базу обслуживания по состоянию без капитальных вложений [8, 13].

Результаты и выводы

Применение предлагаемого подхода позволяет удерживать пары трения в допустимой области режимов смазывания, сократить долю аварийных простоев, а также обосновать рациональный расход смазочных материалов. Технической базой адаптации служат штатные АЦСС экскаваторов ЭКГ и накопленный опыт их применения на карьерной технике.

По результатам исследования сделаны следующие выводы.

1. Интенсивность расходования ресурса подшипников скольжения карьерного экскаватора определяется фактическим сочетанием нагрузки, скорости и параметров подачи смазочного материала; решающим индикатором служит доля граничного режима смазки, предельное значение которой составляет 25 % времени работы сопряжения.

2. Предложенная корректировка режимов смазывания по обобщённому коэффициенту условий эксплуатации K_{Σ} является инструментом управления ресурсом машины, реализуемым программной настройкой параметров АЦСС без изменения конструкции экскаватора.

3. Дальнейшие исследования направлены на экспериментальную проверку зависимости интенсивности изнашивания сопряжений от дозы и интервала подачи смазочного материала и на формирование методики назначения адаптивных режимов смазывания для фактических условий эксплуатации.

Список литературы

1. Пенджиев Э.Д. Пластичные смазки для экскаваторов с централизованными системами смазки. 2015. (выходные данные уточнить).

2. Госман А.И. Применение централизованной системы смазки на примере экскаватора ЭКГ-10 // Горная промышленность. 2007. № 3 (73). С. 42–43.

3. Шешукова Е.И. Обоснование рациональных траекторий отработки забойного блока угольного разреза для повышения ресурса экскаватора: дис. … канд. техн. наук. СПб.: Санкт-Петербургский горный университет, 2026. 157 с.

4. Экскаватор ЭКГ-20КМ. Руководство по эксплуатации 3711.00.00.000 РЭ: в 2 т. ООО «ИЗКАРТЭКС имени П.Г. Коробкова».

5. Рабецкая О.И. Движение смазки в подшипниках скольжения при граничном режиме трения // Вестник КрасГАУ. 2007. № 4. С. 146–152.

6. Никитин Д.Н., Задорожная Е.А., Леванов И.Г. Расчётно-экспериментальная методика определения предотказного состояния сложнонагруженных подшипников скольжения // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». 2022. Т. 22, № 1. С. 5–23. DOI: 10.14529/engin220101.

7. Чишегоров Д.А., Шибанов Д.А. Анализ влияния различных факторов на ресурс экскаватора. СПб.: Санкт-Петербургский горный университет. (выходные данные уточнить).

8. Князькина В.И. Повышение работоспособности трансмиссий горных машин улучшением эксплуатационного режима смазки их ресурсоопределяющих элементов: дис. … канд. техн. наук. СПб.: Санкт-Петербургский горный университет, 2022. 138 с.

9. Савицкий В.Я., Калинин Е.Н., Будимирова Т.С., Кречин А.А. Моделирование режимов смазывания подшипников скольжения триботехнических систем импульсного нагружения // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2024. № 4. С. 157–166. DOI: 10.21685/2072-3059-2024-4-13.
10. Андреева Л.И., Данилкин А.А. Оценка факторов, оказывающих влияние на работоспособность техники, работающей в условиях развития горнотехнических систем // Горное оборудование и электромеханика. 2023. № 4 (168). С. 20–27. DOI: 10.26730/1816-4528-2023-4-20-27.
11. Бессонов А.Е. Обоснование рациональных режимов работы карьерного электрического экскаватора как эргатической системы: дис. … канд. техн. наук. СПб.: Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, 2025. 125 с.
12. Махкамов К.Х., Купайсинова Х.А. Конструкции, назначение и техническое обслуживание подшипников скольжения. (выходные данные уточнить).
13. Корнеев С.В. Методология совершенствования системы технического обслуживания дорожных, строительных и подъёмно-транспортных машин: автореф. дис. … д-ра техн. наук. Омск: СибАДИ, 2003. 36 с.