УДК 622.271.4

Оценка наработки карьерных экскаваторов перспективного модельного ряда в реальных условиях эксплуатации

С.Л.ИВАНОВ, П.В.ИВАНОВА[✉], С.Ю.КУВШИНКИН

Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия

Перспективы развития горнодобывающей отрасли тесно связаны с состоянием и развитием современных горных машин и оборудования, соответствующих техническим и качественным требованиям, предъявляемым горными предприятиями. Предприятия ориентированы на количественную оценку – объемы добычи полезных ископаемых, зависящие от эффективности функционирования перспективного ряда горных машин, к которым относятся современные карьерные экскаваторы. Простои и незапланированные остановки карьерных экскаваторов напрямую зависят от условий эксплуатации горной машины, оказывающих внешнее негативное воздействие на машину в целом и ее техническое состояние, что влечет за собой снижение эффективности использования дорогостоящей горной техники и экономические потери горнодобывающего предприятия.

Приведено обоснование внешних факторов, оказывающих воздействия на наработку и техническое состояние карьерных экскаваторов. Для более детальной оценки влияния внешнего воздействия на эффективность эксплуатации горных машин влияющие факторы делятся на две группы: эргатические, связанные непосредственно с участием человека, и факторы природно-техногенного характера, где участие человека сведено к минимуму. Выявлено, что в наибольшей степени оказывают влияния факторы природно-техногенного характера. Предложен алгоритм комплексной оценки технического состояния и прогнозирования наработки как в номинальных, так и в реальных условиях эксплуатации с учетом факторов природно-техногенного характера.

Предлагается на основе разработанной программы планирования и оценки наработки карьерного экскаватора проводить коррекцию графиков проведения мероприятий по техническому обслуживанию и ремонту (ТО и Р) с целью минимизации количества незапланированных простоев карьерного экскаватора и поддержания его в работоспособном состоянии.

Ключевые слова: карьерный экскаватор; условия эксплуатации; наработка; техническое обслуживание и ремонт; надежность

Как цитировать эту статью: Иванов С.Л. Оценка наработки карьерных экскаваторов перспективного модельного ряда в реальных условиях эксплуатации / С.Л.Иванов, П.В.Иванова, С.Ю.Кувшинкин // Записки Горного института. 2020. Т. 242. С. 228-233. DOI: 10.31897/PMI.2020.2.228

Введение. Одним из перспективных направлений развития горнодобывающей отрасли является увеличение доли разработки месторождений открытым способом. В настоящее время на крупных горнодобывающих предприятиях основным рабочим оборудованием при карьерной добыче являются экскаваторы большой единичной мощности. С развитием машиностроения наметилась устойчивая тенденция роста единичной мощности основного добычного и горнотранспортного оборудования, в том числе и экскаваторов. С ростом грузоподъемности автосамосвалов все больше находят применение экскаваторы с объемом ковша от 20 до 45 м³ и полезной нагрузкой в ковше до 63 т [1, 7, 15, 16, 18, 21, 23, 24].

Цель любой системы – получение максимальной выгоды при минимальных затратах, применительно к карьерным экскаваторам целью будет получение максимальной наработки при минимальных затратах при экскавации горной массы. Ежегодный рост эксплуатационных затрат наряду со снижением наработки экскаватора и его остаточного ресурса ведут к неэффективному использованию ресурсов горнодобывающих предприятий. Таким образом, для достижения поставленной цели необходимо проводить оценку условий эксплуатации машины и минимизировать количество незапланированных простоев.

Постановка проблемы. Как показывает практика, незапланированные остановки, связанные с отказами сложной системы, которой является карьерный экскаватор, могут достигать до 35 % фонда рабочего времени [2, 8, 9, 17, 19, 20, 22]. Техническое состояние и выработка ресурса этих машин напрямую зависят от условий эксплуатации и воздействия внешних факторов. Большой удельный вес отказов, вызванных техногенными, техническими и эргатическими факторами, в первую очередь связан с детерминацией отклика систем привода и управления, высокой жесткостью самого привода и конструкции экскаватора и его рабочего оборудования, что вызывает от-

Рис.1. Факторы, определяющие эффективность функционирования карьерного экскаватора

ветную реакцию горной машины при взаимодействии с породой забоя при непрерывном управлении движения ковша при работе экскаватора и связанными с этим ошибками управления [6].

На основании проведенных теоретических и экспериментальных исследований результаты анализа влияющих факторов, оказывающих существенное воздействие на процесс функционирования карьерных экскаваторов, их техническое состояние и наработку, систематизированы и представлены на рис.1.

Все многочисленные факторы, которые в той или иной степени оказывают влияние на интенсивность деградационных процессов экскаватора в течение его жизненного цикла, можно разделить на две большие группы: эргатические, протекающие с участием человека; природно-техногенные, где непосредственное влияние человеческого фактора отсутствует или оно сведено к минимуму [3, 4, 10]. К первой группе факторов относят управление экскаватором машинистом, характер и уровень ведения горных работ, их организацию при осуществлении технологии добычи, а также характер ведения и уровень работ при техническом обслуживании и ремонте горной машины. К факторам природно-техногенного воздействия относят: горно-геологические и климатические условия, качество подготовки забоя и горной массы, выбранную стратегию технического обслуживания и ремонта и фактор естественного старения техники. Последний фактор присутствует здесь как некоторый идеальный процесс естественного старения экскаватора за период его срока службы при условии, что эксплуатация машины протекает в номинальных (паспортных) условиях эксплуатации. Факторы указанных групп оказывают не одинаковое воздействие на интенсивность деградационных процессов, в результате чего деградационные процессы могут интенсифицировать реальный процесс старения, в случае превышения номинальных параметров эксплуатации, или снижать эту интенсивность при эксплуатации в более комфортных условиях по сравнению с номинальными. Следует отметить, что лишь единственный фактор из всех приведенных направлен на нивелирование деградационных процессов – это фактор, определяющий характер, качество и добросовестность осуществления мероприятий по техническому обслуживанию и ремонту техники [7, 10, 16, 20].

Очевидно, что в результате различной интенсивности проявления тех или иных факторов, обусловленных природно-техногенными условиями, или условий, определяющих уровень проявления эргатических факторов, одинаковые образцы горных машин и, в частности экскаваторов, будут иметь различный уровень деградации и величину остаточного ресурса по истечении равного промежутка времени или отработанного срока службы.

В результате анализа статистической информации по эксплуатации карьерного экскаватора большой единичной мощности было выявлено распределение простоев, вызванных различными факторами (рис.2). Общие простои экскаватора в рассматриваемый период эксплуатации составили порядка 6000 ч, из них 43 % направлены на поддержание работоспособного состояния, связаны с проведением плановых мероприятий по техническому обслуживанию и ремонту, в 24 %

Рис.2. Распределение простоев карьерных экскаваторов большой единичной мощности

случаев причины были связаны с организацией ведения горных работ и управлением экскаватора машинистом (эргатический фактор). На долю отказов, вызванных воздействием факторов природно-техногенного характера, пришлось 33 % всех простоев.

Карьерные экскаваторы, как и другие горные машины, проектируют для конкретных условий эксплуатации, которые для них будут являться номинальными, при этом регламентируются: категория горной породы по трудности экскавации, средний размер куска, допустимый уклон рабочей площадки, климатические условия эксплуатации и т.д.

Применительно к карьерным экскаваторам модели ЭКГ-32Р отечественного производства, заводом-изготовителем ООО «ИЗ-КАРТЭКС имени П.Г.Коробкова» заданы следующие номинальные условия:

- климатические условия – макроклиматическое районы с умеренным или холодным климатом по ГОСТ 15150-69;
- температура окружающего воздуха от -40 до $+40$ °С;
- высота над уровнем моря не более 1000 м;
- невзрывоопасная окружающая среда;
- допускаемые колебания питающего напряжения, подводимого к экскаватору, от -5 до $+10$ %;
- допустимый угол наклона экскаватора при работе не более 5°;
- предназначен для разработки пород III, IV и V категории, разработка производится с предварительным рыхлением, обеспечивающим свободное размещение кусков породы в ковше; допускается применение для разработки пород I и II категории без предварительного рыхления;
- средневзвешенный размер куска в поперечнике до 300 мм;
- негабаритная по ковшу фракция (более 2/3 наименьшего размера зева ковша) не должна превышать 2 %.

Оценка влияния факторов природно-техногенного характера и прогнозирование величины наработки. Поскольку карьерный экскаватор эксплуатируется в различных климатических, горнотехнических и горно-геологических условиях, отличных от номинальных значений, рекомендуемых заводом-изготовителем, необходимо проводить оценку внешнего воздействия на машину факторов природно-техногенного характера, оказывающих существенное влияние на эффективность эксплуатации горных машин [14, 16]. Для оценки весомости каждого фактора природно-техногенного характера был разработан алгоритм (рис.3), позволяющий комплексно оценить степень воздействия внешних условий и точно учесть влияние каждого фактора, тем самым становится возможно определить уровень снижения наработки от воздействия того или иного фактора при его отклонении от номинала, если прочие факторы остаются неизменными [19].

Как показывает практика, по мере увеличения суммарной наработки горных машин интенсивность отказов оборудования возрастает, что влечет за собой увеличение времени на устранение последствий этих отказов и, как следствие, снижение величины выработки экскаватора [5]. С целью минимизации количества незапланированных простоев карьерного экскаватора и повышения его безотказности предлагается на основе разработанного алгоритма проводить коррекцию графиков проведения мероприятий по техническому обслуживанию и ремонту (ТО и Р), учитывая условия эксплуатации машины, в которых она работает.

На основе разработанного алгоритма были созданы информационная модель и компьютерная программа планирования и оценки наработки карьерного экскаватора в конкретных условиях эксплуатации с последующей рекомендацией коррекции графика проведения регламентных работ, направленных на поддержание работоспособного состояния карьерных экскаваторов [11-13].

Прогноз годовой наработки в номинальных и рассматриваемых условиях эксплуатации предлагается определять по формуле

$$Q = 3600 t_{\text{ц}}^{-1} ETK_3 K_{\text{ТО и Р}} K_{\text{НГБ}} K_{\text{УП}} K_{\text{ИП}} \times \\ \times (1 - 5 \cdot 10^{-4} Y^2 + 6 \cdot 10^{-4} Y),$$

где $t_{\text{ц}}$ – время цикла, с; E – вместимость ковша, м³; T – фонд времени, ч; K_3 – коэффициент экскавации, учитывающий горно-геологические условия эксплуатации, категорию горных пород по трудности экскавации; $K_{\text{ТО и Р}}$ – коэффициент стратегии ТО и Р; $K_{\text{НГБ}}$ – коэффициент негабарита, учитывающий качество подготовки забоя и горной массы; $K_{\text{УП}}$ – коэффициент угла наклона рабочей площадки; $K_{\text{ИП}}$ – коэффициент, учитывающий воздействие погодного фактора, определяется согласно индексу жесткости погоды для конкретных условий эксплуатации [8]; Y – число лет эксплуатации карьерного экскаватора.

Заключение. По результатам моделирования с применением предложенной модели для прогнозирования и оценки величины наработки экскаватора следует адаптировать регламент ТО и Р и корректировать графики технического обслуживания и ремонта экскаватора ЭКГ-32Р производства ООО «ИЗ-КАРТЭКС имени П.Г.Коробкова». Адаптация графиков ТО и Р реальным условиям эксплуатации позволяет повысить безотказность сложной технической системы.

Структура ремонтного цикла корректируется с учетом естественного старения экскаватора и факторов природно-техногенного воздействия в условиях эксплуатации. Воздействие внешних условий и естественных процессов, протекающие при эксплуатации горных машин, предлагается оценивать с использованием соответствующих коэффициентов: факторным, учитывающим уменьшение наработки карьерного экскаватора в реальных условиях по отношению к номинальным и коэффициентом старения. Последний учитывает снижение наработки карьерного экскаватора в номинальных условиях эксплуатации с учетом естественного старения машины и определяется как отношение прогнозируемой наработки экскаватора в рассматриваемый год эксплуатации к прогнозируемой наработке в первый год эксплуатации.

Для уточнения технически обоснованных межремонтных периодов при эксплуатации машины необходимо руководствоваться информацией, полученной в ходе компьютерного моделирования и нормативной базой регламента технического обслуживания и ремонта (рис.4).

Рис.3. Последовательность оценки влияния факторов природно-техногенного характера на корректировку графиков регламентных работ в конкретных условиях эксплуатации экскаватора

Рис.4. Структура годового графика мероприятий по ТО и Р карьерных экскаваторов перспективного модельного ряда, рекомендованная заводом-изготовителем для номинальных условий эксплуатации

Рис.5. Скорректированный годовой график мероприятий по ТО и Р с учетом реальных условий эксплуатации

Поскольку коэффициент естественного старения имеет тенденцию к снижению по мере отработки ресурса карьерного экскаватора, для поддержания его в работоспособном состоянии необходимо сокращать межремонтные периоды, что приведет к увеличению количества мероприятий по ТО и Р. Таким образом, для сохранения неизменным уровня надежности карьерного экскаватора в годовой график ППР должны быть введены дополнительные периодические мероприятия по ТО и Р (рис.5).

Из рис.5 следует, что для поддержания работоспособного состояния карьерного экскаватора в реальных условиях эксплуатации структура ремонтных циклов изменилась, были введены дополнительные мероприятия по техническому обслуживанию с целью своевременной подготовки материалов, запчастей, средств механизации, определения состава ремонтной бригады для проведения последующих плановых ремонтных воздействий и как следствие, минимизации незапланированных простоев, вызванных отказами горной техники.

ЛИТЕРАТУРА

1. Анализ структуры и надежности современного парка карьерных экскаваторов / П.В.Иванова, С.А.Асонов, С.Л.Иванов, С.Ю.Кувшинкин // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2017. № 7. С. 51-58.
2. Великанов В.С. Анализ показателей долговечности рукояти карьерного экскаватора / В.С.Великанов, О.Р.Панфилова, И.Г.Усов // Вестник МГТУ им. Г.И.Носова. 2018. Т. 16. № 4. С. 13-20. DOI: 10.18503/1995-2732-2018-16-3-13-20
3. Великанов В.С. О перспективах исследований в области эргономического обеспечения отечественных карьерных экскаваторов / В.С.Великанов, А.А.Шабанов // Известия Тульского государственного университета. 2012. № 4. С. 19-29.
4. Великанов В.С. Оценка одиночных и групповых эргономических показателей горно-транспортного оборудования на основе нечетких моделей / В.С.Великанов, А.А.Шабанов // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2011. № S5. С. 326-332.
5. Жаринов С.Н. Совершенствование расчета производительности карьерного экскаватора / Записки Горного института. 2018. Т. 229. С. 56-61. DOI: 10.25515/рmi.2018.1.56
6. Зотов О.А. Моделирование псевдоформенной конструкции рабочего оборудования одноковшового экскаватора / О.А.Зотов, Д.Ю.Густов // Вестник МГСУ. 2019. Т. 14. Вып. 2. С. 376-385. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.3.376-385
7. Иванов С.Л. Изменение наработки современных отечественных экскаваторов ЭКГ от условий их функционирования // Записки Горного института. 2016. Т. 221. С. 692-700. DOI: 10.18454/рmi.2016.5.692
8. Индекс жесткости погоды как интегральный показатель влияния погодных условий на работоспособность карьерных экскаваторов / П.В.Иванова, С.Л.Иванов, С.Ю.Кувшинкин, Д.А.Шибанов / Открытые горные работы в XXI веке: результаты, проблемы и перспективы развития: Материалы III международной научно-практической конференции // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2017. № 12 (специальный выпуск 38). Т. 2. С. 359-365.
9. Князькина В.И. Диагностика и продление срока службы трансмиссий карьерных экскаваторов / В.И.Князькина, С.Л.Иванов // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2019. Т. 25. № 2. С. 141-148. DOI: 10.18721/JEST.25211
10. Комплексная оценка факторов, определяющих наработку экскаваторов ЭКГ новой продуктовой линейки производства «ИЗ-КАРТЭКС» / Д.А.Шибанов, Д.И.Шишлянников, П.В.Иванова, С.Л.Иванов // Горное оборудование и электромеханика. 2015. № 9 (118). С. 3-9.
11. Макаров В.Н. Достижение наивысших рекордных показателей месячной производительности экскаваторов ЭКГ-18 на разрезах ЗАО «Стройсервис» / В.Н.Макаров, К.Ю.Анистратов // Уголь. 2019. № 1. С. 20-26. DOI: 10.18796/0041-5790-2019-1-20-26

12. Малафеев С.И. Экскаватор ЭКГ-20: новое техническое решение мехатронного комплекса / С.И.Малафеев, В.И.Коняшин, А.А.Новгородов // Уголь. 2019. № 7. С. 4-7. DOI: 10.18796/0041-5790-2019-7-4-7
13. Оценка влияния погоднo-климатического фактора на отказоустойчивость оборудования минерально-сырьевого комплекса / С.Л.Иванов, П.В.Иванова, С.Ю.Кувшинкин, Д.А.Шибанов // Ресурсы Европейского Севера. Технологии и экономика освоения. 2018. № 4 (14). С. 17-27.
14. Побегайло П.А. Физическая модель оценки динамики гидравлических экскаваторов на ранних стадиях проектной деятельности / П.А.Побегайло, А.Н.Ильина // Уголь. 2018. № 12. С. 33-37. DOI: 10.18796/0041-5790-2018-12-33-37
15. Campelo Ana Carla de Melo Moreira. The impact of payload truck factor use in mine performance reports for an open pit copper mine in Brazil / Campelo Ana Carla de Melo Moreira, Marin Tatiane // REM – International Engineering Journal. 2018. Vol. 71. Iss. 3. P. 443-449. DOI: 10.1590/0370-44672017710189
16. Enyindah Ndamzia Clement. Using Diagnosis and Life Cycle Cost to Improve Reliability of an Excavator / Enyindah Ndamzia Clement, Amadi Rex Kemkom // European Journal of Engineering Research and Science. 2019. Vol. 4. Iss. 3. P. 22-26. DOI: 10.24018/ejers.2019.4.3.1107
17. Frimpong S. Dynamic Modeling of Hydraulic Shovel Excavators for Geomaterials / S.Frimpong, Y.Hu, H.Inyang // International Journal of Geomechanics. 2008. Vol. 8(1). P. 20-29. DOI: 10.1061/(ASCE)1532- 3641(2008)8:1(20)
18. Gleason W. Mining at the lowest cost per ton: Innovations for large shovels // Mining engineering. 2013. P. 2-3.
19. Ivanov S.L. Weather conditions as a factor affecting the performance of modern powerful mining excavators / P.V.Ivanova, S.U.Kuvshinkin // Journal of Physics: Conference Series. 2019. Vol. 1399. № 044070. DOI: 10.1088/1742-6596/1399/4/044070
20. Ivanov S.L. Integral criterion of mining machines technical condition level at their operation / S.L.Ivanov, P.V.Shishkin // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science, 2017. Vol. 87. № 022009. DOI: 10.1088/1755-1315/87/2/022009
21. IZ-KARTEX launches a training excavator complex [Electronic resource]. – URL: <https://www.mining-technology.com/contractors/transportation/iz-kartex/pressreleases/pressiz-kartex-excavator> – date of access: 01.07.2019.
22. Lazarević O. Determining the dynamic characteristics of hydraulic excavators / O.Lazarević, B.Lazarević // Vojnotehnički glasnik. 2018. Vol. 66. Iss. 1. P. 41-62. DOI: 10.5937/vojtehg66-14400 (in Serbian).
23. Moradi Afrapoli A. Mining fleet management systems: a review of models and algorithms / A.Moradi Afrapoli, H.Askari-Nasab // International Journal of Mining, Reclamation and Environment. 2017. Vol. 31. № 1. P. 42-60. DOI: 10.1080/1748 0930.2017.1336607
24. Review of fault Mechanism and Diagnostic Technique for the Range Extender Hybrid Electric Vehicle / X.Xu, H.Wang, N.Zang, Z.Liu, X.Wang // Journal of Institute of Electric Electronics Engineers. 2017. Vol. 5. № 14234-14244. DOI: 10.1109/Access.2017, 2725298

Авторы: С.Л.Иванов, д-р техн. наук, профессор, lisa_lisa74@mail.ru (Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия), П.В.Иванова, канд. техн. наук, начальник отдела методического обеспечения образовательного процесса и дополнительных компетенций, rolinariuh@yandex.ru (Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия), С.Ю.Кувшинкин, канд. техн. наук, доцент, minermech@mail.ru (Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия).

Статья поступила в редакцию 09.07.2019.

Статья принята к публикации 02.03.2020.