

АНАЛИЗ УРОВНЯ КВАЛИФИКАЦИИ ОПЕРАТОРА КАРЬЕРНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЭКСКАВАТОРА ПО ПОКАЗАТЕЛЯМ НАРАБОТКИ

*Бессонов А.Е., Шибанов Д.А., Михайлов А.В., Шишкин П.В.
Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург*

Ключевые слова: карьерный электрический экскаватор, эргатическая система, продолжительность цикла, коэффициент наполнения ковша, квалификация оператора, оценка наработки.

Аннотация. В данной статье проведен анализ степени влияния квалификации оператора на наработку карьерного электрического экскаватора на основе оценки среднего времени цикла и коэффициента заполнения ковша. Эффективность работы карьерных электрических экскаваторов зависят от многих факторов, включая опыт и квалификацию оператора. Исходя из поставленной задачи был проведен эксперимент на тренажерном комплексе, предназначенном для обучения операторов карьерных электрических экскаваторов ЭКГ-18Р. В результате эксперимента были получены нагрузочные характеристики приводов экскаватора, отчеты о пройденных контрольных упражнениях, включающими в себя количество ошибок, совершенных оператором, производительность и объем выполненных работ. Результатом исследования, было установлено, что использование среднего времени цикла и коэффициента наполнения ковша позволяют оценить не только производительность, но и количество работы, выполненное при заполнении карьерного самосвала. Предложенный способ оценки квалификации оператора, основанный на измерении среднего времени цикла и коэффициента заполнения ковша, является эффективным. Он позволяет оценить производительность оператора и выявить возможные проблемы или недостатки в его работе.

ANALYSIS OF THE QUALIFICATION LEVEL OF THE OPERATOR OF A QUARRY ELECTRIC EXCAVATOR BY OPERATING TIME INDICATORS

*Bessonov A.E., Shibanov D.A., Mikhailov A.V., Shishkin P.V.
Saint-Petersburg Mining University, Saint-Petersburg*

Keywords: quarry electric excavator, ergatic system, cycle duration, bucket filling coefficient, operator qualification, evaluation of operating time.

Abstract. This article analyzes the degree of influence of the operator's qualifications on the operating time of a quarry electric excavator based on an estimate of the average cycle time and the bucket filling factor. The efficiency of mining electric excavators depends on many factors, including the experience and qualifications of the operator. Based on the task, an experiment was conducted on a training complex designed to train operators of EKG-18R quarry electric excavators. As a result of the experiment, the load characteristics of the excavator drives were obtained, reports on the control exercises completed, including the number of errors committed by the operator, productivity and the amount of work performed. As a result of the study, it was found that the use of the average cycle time and the bucket filling coefficient make it possible to evaluate not only the productivity, but also the amount of work performed when filling a quarry dump truck. The proposed method for assessing the operator's qualifications, based on measuring the average cycle time and bucket filling factor, is effective. It allows you to evaluate the operator's performance and identify possible problems or shortcomings in his work.

Введение. Карьерные электрические экскаваторы являются одним из ключевых видов оборудования в горнодобывающей промышленности. Они эффективно применяются на ряде операций при разработке карьеров полезных ископаемых. Однако, управление такими экскаваторами требует от оператора определенного уровня квалификации и производственного опыта. Приобретенный опыт оператора включает в себя знание и понимание всех управляющих элементов и систем экскаватора, а также умение выполнять работу в соответствии с инструкциями и правилами безопасности при производстве работ [1]. Сюда относятся также умение эффективно планировать и координировать свою работу, обладать навыками профессионального управления экскаватором. Вследствие чего существует необходимость в оценке навыков управления машиниста карьерного электрического экскаватора [2].

Эргатическая система или система человек-машина подразумевает влияние оператора на основные показатели экскаватора. Показатели, определяющие рентабельность машины на рынке (энерговооруженность, энергоемкость экскаватора за один цикл его работы, удельная материалоемкость), включают в себя параметры (время цикла, заполняемость ковша), на которые влияет непосредственно оператор. Данные параметры связаны и с производительностью машины, однако также влияют и на наработку оборудования [3, 4].

Энергоемкость процесса позволяет оценить количество выполненной работы на один кубический метр продукции. Энергоемкость процесса за один цикл его работы, как отношение выполненной работы за один цикл к вместимости ковша ($H \cdot м/м^3$):

$$W_A = \frac{N_Y t_{\text{ц}}}{E}, \quad (1)$$

где N_Y – суммарная мощность электродвигателей экскаватора, необходимая для выполнения рабочего цикла, $кВт$; $t_{\text{ц}}$ – время рабочего цикла, $с$; E – вместимость ковша, $м^3$.

Исходя из формулы (1), можно сделать вывод о влиянии времени рабочего цикла экскаватора. Во время эксплуатации коэффициент наполнения ковша не равняется 100%, можно сделать вывод, что в реальных условиях эксплуатации данный показатель, как правило, ниже номинального [5, 6]. Коэффициент наполнения ковша зависит от физико-механических свойств горной породы, качества подготовки горной массы, высота уступа и навыков оператора и прочих условий. Выполненная работа определяется как суммарное количество работы на всех этапов экскавации ($H \cdot м$):

$$A_{\text{цикла}} = A_{\text{коп}} + A_{\text{под}} + A_{\text{пов}} + A_{\text{выг}} + A_{\text{пов.х}} + A_{\text{он}}, \quad (2)$$

где $A_{\text{коп}}$ – работа сил сопротивления копанию, $H \cdot м$; $A_{\text{под}}$ – работа на подъем грунта, $H \cdot м$; $A_{\text{пов}}$ – работа на поворот экскаватора с грунтом, $H \cdot м$; $A_{\text{выг}}$ – работа на выгрузку грунта, $H \cdot м$; $A_{\text{пов.х}}$ – работа на возврат ковша без грунта, $H \cdot м$; $A_{\text{он}}$ – работа на опускание ковша к началу забоя, $H \cdot м$.

Показатель энергоемкости за один цикл экскавации определяется из представления о том, что ковш при копании будет заполняться полностью. Коэффициент наполнения ковша во время эксплуатации варьируется в зависимости от квалификации оператора. Так работу на копание можно рассмотреть с точки зрения коэффициента наполнения ковша ($H \cdot м$):

$$A_{\text{коп}} = k_{\text{уд.э}} b h l_k, \quad (3)$$

где $k_{\text{уд.э}}$ – удельное сопротивление грунта копанию, $H/м^2$; b – ширина ковша, $м$; h – глубина внедрения ковша в развал горной массы, $м$; l_k – путь копания, $м$.

Выразив объём экскавируемой горной массы через вместимость ковша $q_{\text{э}}$, коэффициент его наполнения k_n и коэффициент разрыхления k_p , выражение для определения величины $A_{\text{коп}}$ примет вид [7, 8] ($H \cdot м$):

$$A_{\text{коп}} = k_{\text{уд.э}} q_{\text{э}} k_p k_n, \quad (4)$$

Таким образом, величина коэффициента наполнения ковша влияет не только на энергоемкость процесса экскавации, но и на количество работы, совершаемое при копании за один цикл, также он присутствует в работе на поворот и подъем, т.к. там учитывается экскавируемая масса.

Исходя из представленного анализа, можно сделать вывод о необходимости учета времени рабочего цикла и значения коэффициента наполнения ковша в качестве комплексного подхода к оценке квалификации оператора, включающего в себя данные параметры вместо производительности, а также необходимые требования к обучению (переквалификации) оператора при переходе на другую модель экскаваторов, в том числе на другой типоразмерный ряд по единичной мощности [9].

Материалы и методы исследования. В ходе исследования был проведен эксперимент на тренажерном комплексе (рис. 1), предназначенном для обучения операторов карьерных экскаваторов ЭКГ-18Р. В функционал комплекса заложен алгоритм имитации работы информационно-диагностической системы (ИДС), полностью соответствующей

устанавливаемой на реальные машины. Данная система в режиме реального времени отображает нагрузку на приводы и выводит мгновенное значение тока и напряжения электродвигателей во времени [10, 11]. Данная система позволяет отслеживать величину нагрузки на приводах подъема, напора, поворота и хода. Диапазон настроек тренажера позволяет моделировать различные условия производства (тип добываемого полезного ископаемого, средневзвешенный размер куска, долю выхода негабарита и пр.).



Рис. 1. Вид тренажерного комплекса ИЗ-КАРТЭКС

Эксперимент проводился на протяжении 35 часов, по прошествии учебного дня оператор проходил контрольное упражнение, которое состояло в заполнении 220-тонного БелАЗа углем при нормальных погодных условиях [12, 13]. Каждое контрольное упражнение фиксировалось в отчете о проделанной работе, состоящим из перечня допущенных ошибок, объема выполненной работы, среднего времени цикла и производительности.

При анализе допущенных ошибок оператора был выделен ряд критических, приводящих к незапланированным отказам машины (табл. 1).

К некритическим ошибкам были отнесены не влияющие непосредственно в дальнейшем на техническое состояние оборудования.

Табл. 1. Ошибки машиниста при работе на тренажере

№	Ошибка
Критические ошибки	
1	Предупреждение: сработала защита от ударов рукояти при напоре и возврате.
2	Запрещенное состояние: задевание ковшом экскаватора за технику.
3	Запрещен поворот платформы, если ковш погружен в породу.
4	Запрещено перемещение экскаватора, если ковш погружен в породу.
5	Запрещенное состояние: стопор в приводе подъема или напора.
6	Запрещенное состояние: удар ковшом о грунт.
Некритические ошибки	
7	Запрещено управление приводами при наложенных тормозах.
8	Запрещено начало работы или перемещение экскаватора без подачи звукового сигнала.

Результаты. По прошествии обучения, проанализировав отчеты контрольных упражнений, был выведен график зависимостей ошибок от отработанных часов (табл. 2, рис. 2). Исходя из полученных результатов, можно сделать вывод, что по прошествии 22 часов количество ошибок снизилось до нуля, что является критерием для получения допуска к работе, также по прошествии 22 часов был отмечен заметный прирост производительности (табл. 3, рис 3).

Табл. 2. Ошибки, совершенные машинистом во время обучения

Дни (часы)	1(3)	2(7)	3(12)	4(17)	5(22)	6(27)	7(31)	8(35)
Ошибки	20	13	4	0	0	1	2	0
1	2	4	2	0	0	0	0	0
2	2	0	0	0	0	0	1	0
3	0	1	0	0	0	1	0	0
4	0	1	1	0	0	0	0	0
5	0	1	1	0	0	0	0	0
6	7	2	0	0	0	0	0	0
7*	1	0	0	0	0	0	0	0
8*	8	4	0	0	0	0	1	0

* – некритические ошибки

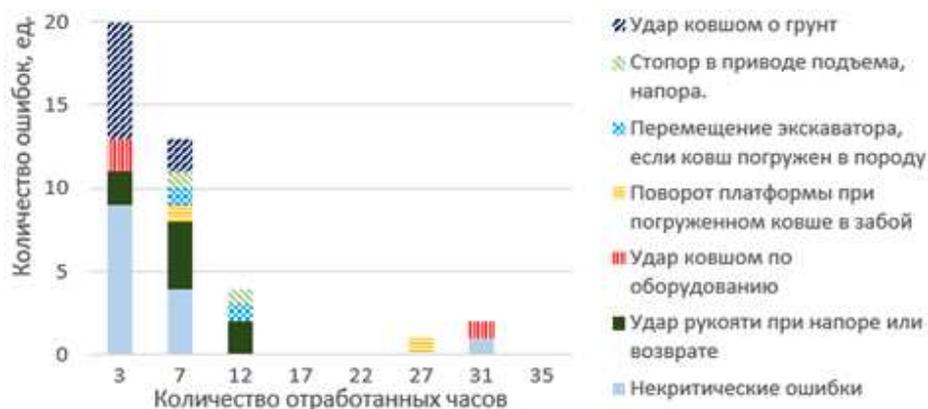


Рис. 2. Зависимость уменьшения количества ошибок от отработанных часов

Табл. 3. Основные параметры наработки по дням обучения

Дни (часы)	1(3)	2(7)	3(12)	4(17)	5(22)	6(27)	7(31)	8(35)
Кол-во циклов, ед	13	18	12	14	10	11	11	11
Среднее время цикла, с	42	30	34	32	36	34	36	32
Коэффициент наполнения ковша, %	77	52	89	73	102	95	92	92
Производительность, $10^{-1} \text{ м}^3/\text{ч}$	117,6	113,1	166,5	146,9	183,4	182,5	164,2	187,9
Объем, м^3	180	350	191	183	184	188	182	183

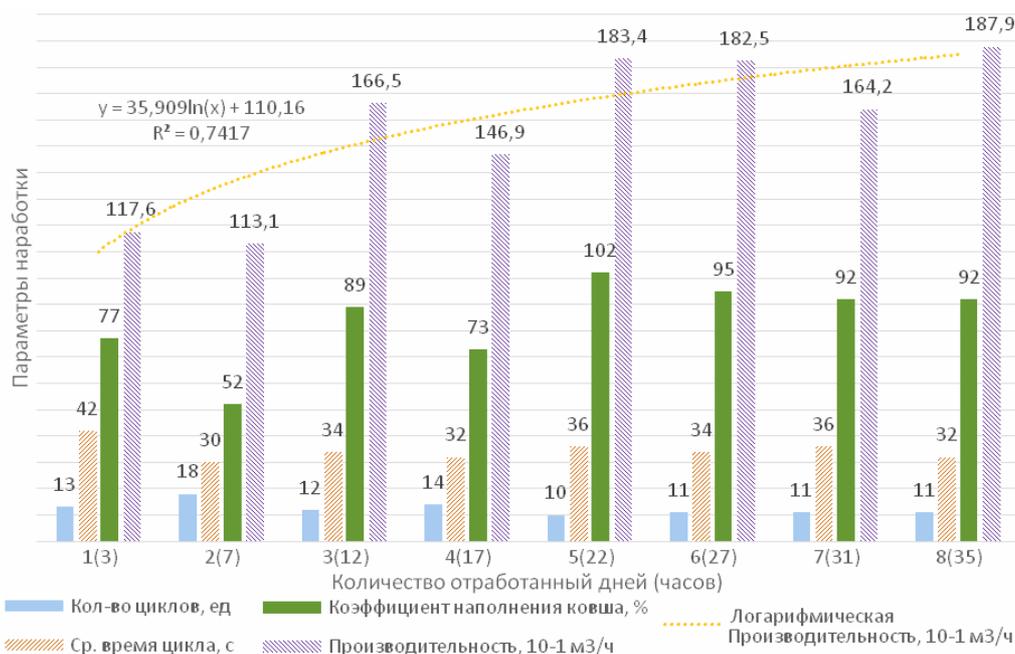


Рис. 3. Зависимость изменения параметров наработки от отработанных часов

При анализе графика зависимости изменения параметров наработки от отработанных часов (рис. 3) стоит обратить внимание на данные, полученные в 5 и 8 дни обучения. В 8 день производительность выше, однако в 5 день больше процент наполнения ковша, вследствие чего количество циклов на наполнение БелАЗа меньше. Вследствие чего количество работы, совершенное оборудованием ниже, в свою очередь является более энергоэффективной схемой экскавации, что позволяет уменьшить наработку рабочего оборудования. Также стоит отметить, что в 5 день, среднее время рабочего цикла больше, чем в 8 день, исходя из чего, необходим комплексный подход к оценке квалификации оператора на основании нескольких параметров рабочего цикла.

Выводы. Комплексный подход к оценке квалификации оператора должен включать в себя не только оценку производительности машины, но и выражать суммарное влияние эргатической системы на функционирование оборудования. Предложена оценка квалификации оператора по двум параметрам: среднее время рабочего цикла и коэффициент наполнения ковша. С одной стороны, производительность учитывает эти два параметра, однако с помощью нее невозможно оценить энергоэффективность процесса экскавации, что в свою очередь также сказывается и на оценке наработки рабочего оборудования. Предложенный подход в совокупности с анализом совершаемых оператором ошибок позволяет оценить необходимость его переобучения или окончания обучения при переходе на другую модель экскаватора.

Необходимо более детально проанализировать изменение времени рабочего цикла с учетом разделения времени рабочего цикла на два периода: время копания и время, затрачиваемое на остальные операции. Такой подход позволит оценивать квалификацию оператора со стороны совмещения большей части операций, время копания в свою очередь должно иметь минимальный разброс значений.

Список литературы

1. Ligotsky D.N. A Review of Mining and Loading Equipment Currently used for Open Pit Mining // *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2019, vol. 14, no. 19, pp. 7154-7158.
2. Махно Д.Е., Зельцер П.Я. К методике оценки уровня квалификации машиниста экскаватора // *Вестник Иркутского государственного технического университета*. – 2011. – № 12. – С. 105-107.
3. Корогодин А.С., Иванов С.Л. Прогнозирование остаточного ресурса опорных подшипниковых узлов барабанной мельницы для оценки долговечности работы на основе изменения поля температур // *Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство*. – 2022. – №17-1. – С. 186-195.
4. Насонов М.Ю., Лыков Ю.В., Чонг Д.Д. Исследование ресурса и долговечности металлических конструкций экскаваторов после истечения срока эксплуатации // *Уголь*. – 2020. – №2(1127). – С. 13-17.
5. Иванов С.Л., Иванова П.В., Кувшинкин С.Ю. Оценка наработки карьерных экскаваторов перспективного модельного ряда в реальных условиях эксплуатации // *Записки горного института*. – 2020. – Т. 242. – С. 228-233.
6. Великанов В.С. Прогнозирование нагруженности рабочего оборудования карьерного экскаватора по нечетко-логистической модели // *Записки Горного института*. – 2020. – Т. 241. – С. 29-36.
7. Баловнев В.И. Определение оптимальных параметров и выбор дорожно-строительных машин методом анализа четвертой координаты. – М.: МАДИ, 2014. –181 с.
8. Баловнев В.И. Определение оптимальных параметров и выбор землеройных машин в зависимости от условий эксплуатации – М.: МАДИ. 2010. – 133 с.
9. Махно Д.Е., Зельцер П.Я. К методике оценки уровня квалификации машиниста экскаватора // *Вестник Иркутского государственного технического университета*. – 2011. – №12. – С. 105-107.
10. Емельянов А.А., Иванов С.Л., Шибанов Д.А. К вопросу оценки влияния квалификации машиниста на техническое состояние экскаватора // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. – 2017. – №38. – С. 442-453.
11. Костыгова Д.М., Емельянов А.А. Имитационное моделирование карьерного экскаватора ЭКГ-18Р производства ООО «ИЗ-КАРТЭКС» в тренажере подготовки машинистов // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. – 2017. – №10. – С. 177-184.
12. Великанов В.С., Великанова С.С. Исследование связи между коэффициентом управления и квалификацией машиниста экскаватора // *Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности*. – 2009. – С. 24-28.

13. Бессонов А.Е., Шибанов Д.А., Михайлов А.В. Влияние эргатической системы на время рабочего цикла карьерного электрического экскаватора // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. – 2022. – №15. – С. 136-141.

References

1. Ligotsky D.N. A Review of Mining and Loading Equipment Currently used for Open Pit Mining // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. 2019, vol. 14, no. 19, pp. 7154-7158.
2. Makhno D.E., Zeltser P.Ya. To the methodology of assessing the level of qualification of an excavator driver // Bulletin of the Irkutsk State Technical University. 2011, no. 12, pp. 105-107.
3. Korogodin A.S., Ivanov S.L. Forecasting the residual life of the drum mill bearing units for assessing the durability of work based on changes in the temperature field // Transport, mining and construction engineering: science and production. 2022, no. 17-1, pp. 186-195.
4. Nasonov M.Yu., Lykov Yu.V., Chong D.D. Study of the resource and durability of metal structures of excavators after the expiration of their service life // Coal. 2020, no. 2(1127), pp. 13-17.
5. Ivanov S.L., Ivanova P.V., Kuvshinkin S.Yu. Evaluation of mining excavators of a promising model range in real operating conditions // Journal of Mining Institute. 2020, vol. 242, pp. 228-233.
6. Velikanov V.S. Predicting the load of working equipment of a quarry excavator using a fuzzy logistic model // Journal of Mining Institute. 2020, vol. 241, pp. 29-36.
7. Balovnev V.I. Determination of optimal parameters and selection of road-building machines by analysis of the fourth coordinate. – М.: MADI, 2014. –181 p.
8. Balovnev V.I. Determination of optimal parameters and selection of earthmoving machines depending on operating conditions – М.: MADI. 2010. – 133 p
9. Makhno D.E., Zeltser P.Ya. To the methodology for assessing the level of qualification of an excavator driver // Bulletin of the Irkutsk State Technical University. 2011, no. 12, pp. 105-107.
10. Emelyanov A.A., Ivanov S.L., Shibanov D.A. On the issue of assessing the influence of the driver's qualification on the technical condition of the excavator // Mining information and analytical bulletin. 2017, no. 38, pp. 442-453.
11. Kostygova D.M., Emelyanov A.A. Simulation modeling of a quarry EKG-18R excavator manufactured by IZ-KARTEX LLC in the simulator for training machinists // Mining information and analytical bulletin. 2017, no. 10, pp. 177-184.
12. Velikanov V.S., Velikanova S.S. Investigation of the relationship between the control coefficient and the qualification of an excavator driver // Technological equipment for mining and oil and gas industry: collection of scientific tr. 2009, pp. 24-28.
13. Bessonov A.E., Shibanov D.A., Mikhailov A.V. The influence of the ergatic system on the working cycle of a quarry electric excavator // Transport, mining and construction engineering: science and production. 2022, no. 15, pp. 136-141.

Сведения об авторах:

Information about authors:

Бессонов Александр Евгеньевич – аспирант	Bessonov Aleksandr Evgenievich – postgraduate student
Шибанов Даниил Александрович – кандидат технических наук, доцент кафедры машиностроения	Shibanov Daniil Aleksandrovich – candidate of technical sciences, associate professor of mechanical engineering Department
Михайлов Александр Викторович – доктор технических наук, профессор кафедры машиностроения	Mikhailov Aleksandr Viktorovich – doctor of technical sciences, professor of mechanical engineering Department
Шишкин Павел Витальевич – кандидат технических наук, заместитель декана механико-машиностроительного факультета	Shishkin Pavel Vitalievich – candidate of technical sciences, deputy dean of the Faculty of mechanical engineering
be5son0v@yandex.ru	

Получена 30.06.2023