

ЭНЕРГОЕМКОСТЬ ПРОЦЕССА ЭКСКАВАЦИИ ГОРНЫХ ПОРОД РАБОЧИМ ОБОРУДОВАНИЕМ ТИПА ПРЯМАЯ ЛОПАТА КАРЬЕРНОГО ЭКСКАВАТОРА

Аннотация: Установлено, что в процессе экскавации грунта при совместном действии приводов главных механизмов карьерного экскаватора (подъема и напора) происходит изменение уровня энергопотребления как отдельных приводов, так и в целом силовой установки. Выявлены основные факторы, определяющие распределение потребляемой мощности между приводами главных механизмов. Предложена методика расчета энергетической характеристики карьерного экскаватора при отработке забоя в конкретных горнотехнических условиях работы на основе имитационной модели рабочего процесса карьерного экскаватора.

Ключевые слова: карьерный экскаватор, приводы главных механизмов, энергоемкость процесса экскавации.

Информация о статье: принята 01 августа 2019 г.
DOI: 10.26730/1816-4528-2019-3-9-13

Введение

В настоящее время уровень энергопотребления является одним из главных показателей эффективности функционирования технологического оборудования, в частности, карьерных экскаваторов.

Обзор публикаций по проблеме энергосбережения и повышения энергетической эффективности оборудования [1 – 11] показал, что они посвящены в основном методологическим аспектам потребления энергетических ресурсов и выявлению резервов повышения энергетической эффективности оборудования.

Вместе с тем вопросы формирования энергозатрат при функционировании оборудования и при определении рационального уровня энергопотребления для конкретных условий эксплуатации рассмотрены не в полной мере.

Определение уровня энергопотребления как отдельных приводов технологического оборудования, так и в целом силовой установки во взаимосвязи с условиями эксплуатации позволит повысить эффективность использования энергетических ресурсов.

Цель и задачи работы

Целью исследования является обоснование энергетической характеристики карьерного экскаватора, определяющей взаимосвязи между горнотехническими условиями работы и эксплуатационными показателями экскаватора – производительностью и энергопотреблением.

Задачи работы:

- определение уровня энергопотребления приводами главных механизмов в процессе экскавации горных пород;
- оценка уровня энергопотребления при отработке экскаваторного забоя;

- выявление основных факторов, формирующих энергопотребление.

Решение задач исследования

Объект исследования – процесс экскавации горных пород рабочим оборудованием типа прямая лопата карьерного экскаватора.

Предмет исследования – определение энергопотребления приводами главных механизмов при экскавации горных пород.

Методы исследования – математическое моделирование и вычислительный эксперимент.

На основе имитационной модели процесса экскавации горных пород [12] проведен вычислительный эксперимент по расчету режимных параметров главных механизмов и мгновенных мощностей усилий подъема и напора для карьерного экскаватора ЭЖГ-20А производства ПАО «Уралмашзавод».

Исходные данные для расчета:

- координаты звена «рукоять-ковш», а именно координаты точки K (вершины режущей кромки ковша) – X_K и Y_K ;
- скорость копания $V_K = 1$ м;
- угол наклона касательной к траектории перемещения ковша $\psi = 60^\circ$;
- радиусы копания на уровне стояния экскаватора для начальной, средней и конечной траекторий составляют $R_{к.ус} = 9, 12$ и 15 м;
- максимальная высота копания $H_{к.мах} = 17$ м.

В табл. 1 и 2 и на рис. 1 и 2 приведены результаты расчета при отработке забоев высотой 12 и 17 м, ширине заходки $A = 6$ м.

Величина энергопотребления определяется в зависимости от значений мгновенных мощностей усилий подъема и напора и составит

Таблица 1. Режимные параметры главных механизмов экскаватора ЭКГ-20А при высоте копания $H_k = 12$ м

№ п/п	Координаты точки К		Скорости подъема и напора		Усилия подъема и напора		Мощности усилий	
	$X_K, \text{ м}$	$Y_K, \text{ м}$	$V_{п}, \text{ м/с}$	$V_{н}, \text{ м/с}$	$F_{п}, \text{ кН}$	$F_{н}, \text{ кН}$	$P_{п}, \text{ кВт}$	$P_{н}, \text{ кВт}$
Начальная траектория ($X_{к0} = 9$ м)								
1	9,0	0	0,95	-0,87	437	-581	415	504
2	10,15	2	0,92	-0,81	509	-577	465	465
3	11,30	4	0,84	-0,70	574	-588	481	410
4	12,45	6	0,70	-0,51	692	-581	481	294
5	13,60	8	0,52	-0,19	916	-583	480	113
6	14,75	10	0,50	0,19	1240	-673	626	126
7	15,90	12	0,66	0,50	1585	-840	1039	422
Средняя траектория ($X_{к0} = 12$ м)								
8	12,0	0	0,90	-0,72	678	-341	613	246
9	13,15	2	0,85	-0,61	723	-351	617	214
10	14,30	4	0,78	-0,45	764	-358	596	160
11	15,45	6	0,70	-0,23	847	-333	589	75
12	16,60	8	0,65	0,04	951	-289	614	11
13	17,75	10	0,66	0,29	1047	-219	687	64
14	18,90	12	0,69	0,50	1102	-89	763	45
Конечная траектория ($X_{к0} = 15$ м)								
15	15,0	0	0,85	-0,55	857	-121	728	67
16	16,15	2	0,80	-0,42	893	-114	713	48
17	17,30	4	0,74	-0,24	930	-89	690	22
18	18,45	6	0,69	-0,04	974	-32	670	1
19	19,60	8	0,64	0,16	1027	70	661	11
20	20,75	10	0,60	0,35	1083	233	646	81
21	21,90	12	0,51	0,50	1143	483	578	242

$$\mathcal{E} = \sum_{i=1}^n 0,5(P_i + P_{i+1})\Delta t$$

где P_i и P_{i+1} – значения мгновенных мощностей усилий подъема и напора для i -ой и $i + 1$ точек траектории перемещения ковша (вершины режущей кромки); Δt – длительность перемещения ковша на отрезке ($i, i + 1$).

На рис. 3 и 4 представлены графики изменения энергопотребления при перемещении ковша в процессе экскавации по эквидистантным траекториям при отработке забоев различной высоты (12 и 17 м).

Из приведенных графиков видно, что величина энергопотребления двигателем механизма подъема при перемещении ковша по эквидистантным траекториям практически не меняется, за исключением начальной траектории при $R_{к.у.с} = 9$ м (где противодействие главных механизмов проявляется в наибольшей степени).

Величина энергопотребления двигателем механизма напора при максимальной высоте забоя $H_3 = 17$ м в целом практически не меняется, а при высоте забоя $H_3 = 12$ м – уменьшается.

Величина общего энергопотребления двигателями при перемещении ковша по эквидистантным траекториям в целом практически не меняется.

Приведенные графики (рис. 3 и 4) представляют собой единичные энергетические характеристики, т. е. зависимости энергопотребления от энергосиловых параметров, реализуемых на режущей кромке ковша при перемещении ковша по заданной траектории, соответствующей схеме отработки забоя.

На основе единичных энергетических характеристик может быть определен интегральный показатель – энергоемкость процесса экскавации для конкретных горнотехнических условий эксплуатации по заданной схеме отработки экскаваторного забоя.

Энергоемкость процесса экскавации составит

$$a = \frac{\mathcal{E}_{\text{сум}}}{V}$$

где $\mathcal{E}_{\text{сум}}$ – суммарное энергопотребление двигателем подъема и напора при отработке фрагмента экскаваторного забоя при ширине заходки $A = 6$ м; V – объем фрагмента забоя, ширина которого равна ширине ковша.

Расчетная величина энергоемкости процесса экскавации составила при высоте забоя $H_3 = 12$ м $a_{12} = 1010$ кПа, а при высоте забоя $H_3 = 17$ м $a_{17} = 1330$ кПа.

Таким образом, на основе имитационной модели процесса экскавации горных пород карьерным экскаватором производится оценка как единичных энергетических характеристик, так и энергоемкости процесса экскавации в целом.

Заключение

Обоснование энергетических характеристик процесса экскавации горных пород рабочим оборудованием типа прямая лопата карьерного экскаватора, являющимся одним из основных потребителей электроэнергии на горных предприятиях, позволит создать систему мониторинга энергопотребления при отработке экскаваторного забоя в конкретных горнотехнических условиях эксплуатации.

Таблица 2. Режимные параметры главных механизмов экскаватора ЭКГ-20А при высоте копания $H_k = 17$ м

№ п/п	Координаты точки К		Скорости подъема и напора		Усилия подъема и напора		Мощности усилий	
	$X_K, \text{ м}$	$Y_K, \text{ м}$	$V_{п}, \text{ м/с}$	$V_{н}, \text{ м/с}$	$F_{п}, \text{ кН}$	$F_{н}, \text{ кН}$	$P_{п}, \text{ кВт}$	$P_{н}, \text{ кВт}$
Начальная траектория ($X_{к0} = 9$ м)								
1	9,0	0	0,95	-0,87	290	-630	275	550
2	10,15	2	0,92	-0,81	350	-620	331	490
3	11,30	4	0,84	-0,70	420	-605	352	421
4	12,45	6	0,70	-0,51	520	-580	359	292
5	13,60	8	0,52	-0,19	700	-555	366	106
6	14,75	10	0,50	0,19	975	-590	489	110
7	15,90	12	0,66	0,50	1270	-700	826	348
8	17,05	14	0,80	0,70	1560	-850	1220	578
9	18,20	16	0,89	0,81	1810	-1005	1580	795
10	18,80	17	0,91	0,84	1910	-1060	1770	923
Средняя траектория ($X_{к0} = 12$ м)								
11	12,0	0	0,90	-0,72	517	-411	468	296
12	13,15	2	0,85	-0,61	560	-402	478	246
13	14,30	4	0,78	-0,45	595	-395	464	177
14	15,45	6	0,70	-0,23	674	-346	472	80
15	16,60	8	0,65	0,04	755	-294	487	11
16	17,75	10	0,66	0,29	838	-217	550	64
17	18,90	12	0,69	0,50	886	-95	613	48
18	20,05	14	0,68	0,65	896	115	608	74
19	21,20	16	0,49	0,75	890	497	433	371
20	21,80	17	0,25	0,78	960	806	218	638
Конечная траектория ($X_{к0} = 15$ м)								
21	15,0	0	0,85	-0,55	690	-207	586	114
22	16,15	2	0,80	-0,42	722	-187	577	78
23	17,30	4	0,74	-0,24	754	-152	559	37
24	18,45	6	0,69	-0,04	791	-91	544	4
25	19,60	8	0,64	0,16	835	9	538	1
26	20,75	10	0,60	0,35	885	156	528	54
27	21,90	12	0,51	0,50	937	372	474	186
28	23,05	14	0,32	0,62	1010	685	327	423
29	24,20	16	0,04	0,70	1180	1130	43	793
*30	24,80	17	-0,12	0,74	1350	1420	225	1057

* - вариант расчетный.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Берман А.В. Метод определения энерговооруженности рабочего процесса экскавации во взаимосвязи с параметрами массива горных пород / А.В. Берман, Г.Я. Воронков, Р.Р. Гайнуллин // Открытые горные работы. 2000. № 3. С. 25-28.
- Комиссаров А.П. Метод оценки рабочих параметров карьерного экскаватора в конкретных условиях эксплуатации // Горные машины и автоматика. 2003. № 6. С. 33-35.
- Комиссаров А.П., Лагунова Ю.А., Шестаков В.С. Сравнительная оценка энергетических характеристик карьерных экскаваторов // Горное оборудование и электромеханика. 2014. № 2. С. 14-16.
- Малафеев С.И., Серебрянников Н.А. Повышение энергетической эффективности карьерных экскаваторов на основе модернизации электрооборудования и систем управления // Уголь. 2018. № 10. С. 30-33.
- Об энергосбережении и повышении энергетической эффективности в АК «АЛРОСА» / Н.А.

Соловьева, А.И. Крашенинников, И.В. Зырянов, А.В. Рыбников // Горное оборудование и электромеханика. 2016. № 2. С. 16-19.

6. Савченко А.Я. Совершенствование методологии оценки качества высокопроизводительного экскавационного оборудования большой единичной мощности на этапе эксплуатации // Горные машины и автоматика. 2001. № 1. С. 4-6.

7. Слесарев Б.В. Исследование условий и параметров экскавации мощных карьерных экскаваторов / Б.В. Слесарев, П. Булес // Материалы конференции «Машины и оборудование для открытых горных работ». В рамках 19-й Международной выставки «Горное оборудование, добыча и обогащение руд и минералов», 21 апреля 2015, Москва, С. 3-4.

8. Тангаев И.А. Энергоемкость процессов добычи и переработки полезных ископаемых. М.: Недра, 1986. 232 с.

9. Awuah-Offei K. Energy efficiency in the Minerals Industry: Best Practices and Research Directions, Springer, 2017. 333 p.

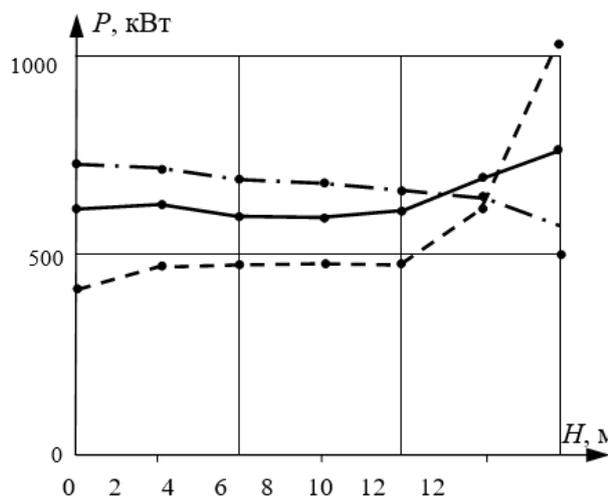


Рис. 1. Графики изменения мощности усилия подъема при перемещении ковша по эквидистантным траекториям при высоте забоя $H=12$ м
 ---- - начальная траектория;
 — - средняя траектория;
 - · - конечная траектория

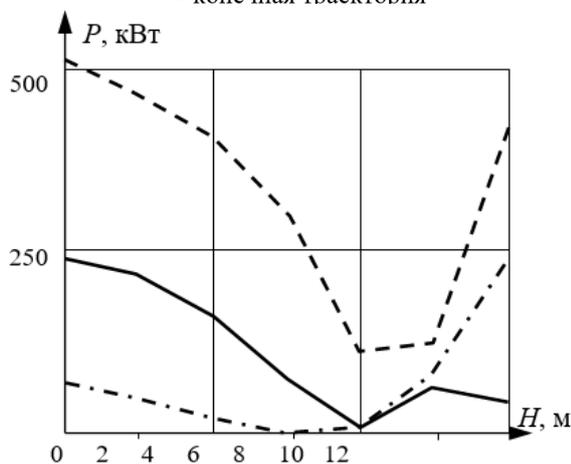


Рис. 2. Графики изменения мощности усилия напора при перемещении ковша по эквидистантным траекториям при высоте забоя $H=12$ м
 ---- - начальная траектория;
 — - средняя траектория;
 - · - конечная траектория

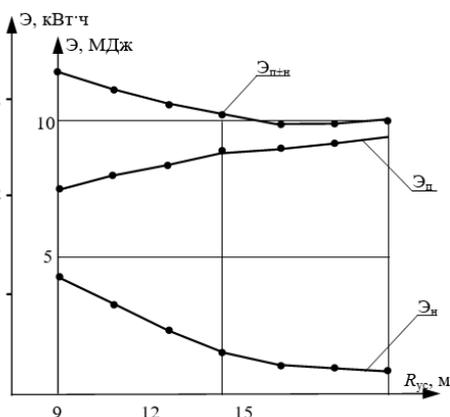


Рис. 3. Энергопотребление двигателями механизмов подъема \mathcal{E}_n и напора \mathcal{E}_n , а также общего энергопотребления \mathcal{E}_{n+n} при перемещении ковша по эквидистантным траекториям (высота забоя $H_3=12$ м)

10. Frimpong S., Hu Y., Chang Z. Performance simulation of shovel excavators for earthmoving operations // In Summer in computer simulation conference (SCSC'03). 2003. pp. 133-138.

11. Geu Flores F., Kecskemethy A., Pottker A. Workspace analysis and maximal force calculation of a face-shovel excavator using kinematical transformers. 12th IFToMM World Congress, Besancon, June 18-21, 2007. 6 pp.

12. Комиссаров А.П., Летнев К.Ю. Разработка имитационной модели процесса экскавации горных пород рабочим оборудованием прямая лопата карьерного экскаватора // Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности: сб. трудов XVII Междунар. науч.-техн. конф. «Чтения памяти В. Р. Кубачека», 04-05 апреля 2019 г., Екатеринбург. Изд. УГГУ, 2019. С. 267-270.

K. Yu. Letnev, postgraduate

Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin,
 620002, Russia, Yekaterinburg, ul. Mira, 19

ENERGY INTENSITY OF THE ROCK EXCAVATION PROCESS BY AN OPEN-PIT EXCAVATOR WITH THE FRONT SHOVEL TYPE IMPLEMENT

Abstract: It has been established that in the process of soil excavation with the combined action of the drives of the main mechanisms of an open-pit excavator (hoist and crowd), the level of energy consumption of both individual drives and the power plant as a whole changes. The main factors that determine the distribution of power consumption between the drives of the main mechanisms are identified. A technique is proposed for calculating the energy characteristics of a mining excavator when mining a face in specific mining operating conditions based on a simulation model of a mining excavator working process.

Keywords: open-pit excavator, drives of the main mechanisms, energy intensity of the excavation process.

Article info: received August 01, 2019
 DOI: 10.26730/1816-4528-2019-3-9-13

REFERENCES

- Berman A.V. Metod opredeleniya energovoornozhennosti rabocheho processa ekskavatsii vo vzaimosvyazi s parametrami massiva gornyh porod / A. V. Berman, G. YA. Voronkov, R.R. Gajnullin // Otkrytye gornye raboty. 2000. № 3. S. 25-28.
- Komissarov A.P. Metod ocenki rabochnih parametrov kar'ernogo ekskavatora v kon-kretnykh

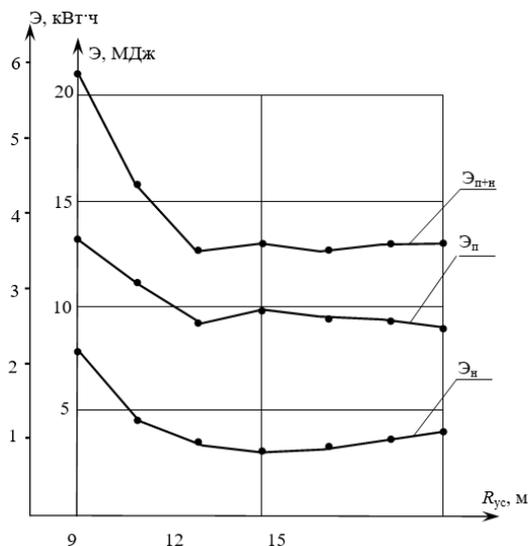


Рис. 4. Энергопотребление двигателями механизмов подъема \mathcal{E}_n и напора \mathcal{E}_n , а также общего энергопотребления \mathcal{E}_{n+n} при перемещении ковша по эквидистантным траекториям (высота забоя $H_3=17$ м)

usloviyah ekspluatatsii // Gornye mashiny i avtomatika. 2003. № 6. S. 33-35.

3. Komissarov AP., Lagunova YU. A., Shestakov V.S. Sravnitel'naya ocenka energo-ticheskikh harakteristik kar'ernykh ekskavatorov // Gornoe oborudovanie i elektromekhanika. 2014. № 2. S. 14-16.

4. Malafeev S.I., Serebrennikov N. A. Povyshenie energeticheskoy effektivnosti kar'ernykh ekskavatorov na osnove modernizatsii elektrooborudovaniya i sistem upravleniya // Ugol'. 2018. № 10. S. 30-33.

5. Ob energosberezhenii i povyshenii energeticheskoy effektivnosti v AK «ALROSA» / N.A. Solov'eva, A.I. Krashennikov, I.V. Zyryanov, A.V. Rybnikov // Gornoe oborudovanie i elektromekhanika. 2016. № 2. S. 16-19.

Библиографическое описание статьи

Летнев К.Ю. Энергоемкость процесса экскавации горных пород рабочим оборудованием типа прямая лопата карьерного экскаватора // Горное оборудование и электромеханика – 2019. – № 3 (143). – С. 9-13.

6. Savchenko A.YA. Sovershenstvovanie metodologii ocenki kachestva vysokoproizvoditel'nogo ekskavacionnogo oborudovaniya bol'shoj edinichnoj moshchnosti na etape ekspluatatsii // Gornye mashiny i avtomatika. 2001. № 1. S. 4-6.

7. Slesarev B.V. Issledovanie usloviy i parametrov ekskavatsii moshchnykh kar'ernykh ekskavatorov / B.V. Slesarev, P. Bules // Materialy konferentsii «Mashiny i oborudovanie dlya otkrytykh gornykh rabot». V ramkah 19-j Mezhdunarodnoj vystavki «Gornoe oborudovanie, dobycha i obogashchenie rud i mineralov», 21 aprelya 2015, Moskva, S. 3-4.

8. Tangaev I.A. Energoemkost' processov dobychi i pererabotki poleznykh iskopae-myh. M.: Nedra, 1986. 232 s.

9. Awuah-Offei K. Energy efficiency in the Minerals Industry: Best Practices and Research Directions, Springer, 2017. 333 p.

10. Frimpong S., Nu Y., Chang Z. Performance simulation of shovel excavators for earth-moving operations // In Summer in computer simulation conference (SCSC/03). 2003. pp. 133-138.

11. Geu Flores F., Kecskemethy A., Pottker A. Workspace analysis and maximal force calculation of a face-shovel excavator using kinematical transformers. 12th IFToMM World Congress, Besancon, June 18-21, 2007. 6 pp.

12. Komissarov A.P., Letnyov K.YU. Razrabotka imitacionnoj modeli processa ekskavatsii gornykh porod rabochim oborudovaniem pryamaya lopata kar'ernogo ekskavatora // Tekhnologicheskoe oborudovanie dlya gornoy i neftegazovoy promyshlennosti: sb. trudov HVII Mezhdunar. nauch.-tekh. konf. «CHteniya pamyati V. R. Kubacheka», 04-05 aprelya 2019 g., Ekaterinburg. Izd. UGGU, 2019. S. 267-270..

Reference to article

Letnev K.Yu. Energy intensity of the rock excavation process by an open-pit excavator with the front shovel type implement. Mining Equipment and Electromechanics, 2019, no. 3 (143), pp. 9-13.