

## ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ, УСЛОВИЙ И РЕЖИМА РАБОТЫ ОДНОКОВШОВОГО ЭКСКАВАТОРА НА ЭКСПЛУАТАЦИОННУЮ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ

Г.И. Бабокин

НИТУ «МИСиС», Москва, Россия, e-mail: babokinginov@yandex.ru

**Аннотация:** Исследовано влияние технических параметров, условий и режима работы одноковшового экскаватора с рабочим оборудованием «прямая лопата» на средний удельный расход потребляемой электрической энергии, характеризующий энергоэффективность его работы. Исследование актуально для сравнения энергетической эффективности экскаваторов с различным оборудованием, а также при планировании и нормировании энергетических и технико-экономических показателей добычного оборудования и разреза. Разработана аналитическая методика расчета удельного расхода электрической энергии экскаватора, учитывающая удельное сопротивление копанью, коэффициент готовности, длительность технического обслуживания и дополнительных технологических операций, длительность организационных простоев и простоев из-за отказов системы внешнего электроснабжения. При расчете потребления электрической энергии экскаватором учтена нагрузка электропривода основных механизмов и электрооборудования вспомогательных систем — освещения, отопления, вентиляции, технологического оборудования для технического обслуживания и ремонта. Представлены зависимости удельного расхода электрической энергии от сменной производительности экскаватора ЭКГ8И при изменении сопротивления копанью в пределах  $(0,5—2,5) \cdot 10^5$  Па и изменении параметров режима работы в широких пределах. Сравнение расчетных и экспериментальных энерготехнологических характеристик экскаватора, полученных для экскаватора ЭКГ8И, работавшего в условиях разреза Восточно-Бейский ОАО «СУЭК-Хакасия», показало, что точность расчета составляет 9—16%. Установлен диапазон изменения производительности и коэффициента внутрисменного использования экскаватора, в котором эксплуатационный удельный расход электрической энергии минимален, и дана количественная оценка увеличения удельного расхода электрической энергии с уменьшением производительности. Дана количественная оценка снижения эксплуатационного удельного расхода электрической энергии экскаватора при повышении коэффициента готовности экскаватора, характеризующего его надежность. Показано, что применение частотно-регулируемого электропривода вместо системы «генератор-двигатель» для основных механизмов одноковшового экскаватора позволяет снизить эксплуатационный удельный расход электрической энергии экскаватора на 20—25%.

**Ключевые слова:** экскаватор, удельный расход энергии, эксплуатационная энергоэффективность, сопротивление копанью, производительность, режим работы, коэффициент готовности, коэффициент внутрисменного использования.

**Для цитирования:** Бабокин Г. И. Оценка влияния технических параметров, условий и режима работы одноковшового экскаватора на эксплуатационную энергоэффективность // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2019. — № 11. — С. 199—207. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-11-0-199-207.

---

## Influence of technical parameters, work conditions and operating mode on energy efficiency of single-bucket exactor

G.I. Babokin

National University of Science and Technology «MISiS», Moscow, Russia, e-mail: babokinginov@yandex.ru

---

**Abstract:** The influence exerted by the technical parameters, work conditions and operating mode of a single-bucket excavator with front shovel attachment on the average specific power consumption governing the energy efficiency of the machine operation is studied analytically. The study is relevant for the comparison of energy efficiency of excavators with different attachments, as well as for planning and rating of energy and economic performance of shoveling machines and open pit mines. The analytical calculation procedure is developed for the specific power consumption by shovels with regard to specific digging resistance, availability factor, duration of maintenance and additional technological operations, length of organizational downtime and idle time due to external power supply failure. The calculation of the power consumption by excavators includes load of electric drives of basic mechanisms and electricians of auxiliary systems—lighting, heating, airing, maintenance and repair equipment. The article presents the dependences of the specific power consumption on the shift output of excavator EKG8I at the change in the digging resistance within  $(0.5—2.5) \cdot 10^5$  Pa with operating mode parameters varied in a wide range. The comparison of the calculated and experimental power characteristics of excavator EKG8I in operating conditions of the Vostochno-Beisky open pit mine of SUEK-Khakassia shows that the calculation accuracy is 9–16%. The variation range is set for the excavator capacity and shift utilization factor with the minimum specific power consumption, and the rise in the specific power consumption with decreasing capacity is assessed quantitatively. Furthermore, the decrease in the specific power consumption with increasing availability factor, characterizing reliability of excavator is quantified. It is shown that the use of the variable frequency drive instead of the generator–motor system for basic mechanisms of a single-bucket excavator allows reducing the specific power consumption of the machine by 20–25%. The developed procedure and research findings are applicable in planning and rating of parameters for energy efficiency improvement of excavating machines.

**Key words:** excavator, specific power consumption, operation energy efficiency, digging resistance, capacity, operating model availability factor, shift utilization factor.

**For citation:** Babokin G. I. Influence of technical parameters, work conditions and operating mode on energy efficiency of single-bucket exactor. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2019;(11):199-207. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-11-0-199-207.

---

### Введение

Одноковшовые экскаваторы с рабочим оборудованием «прямая лопата» находят широкое применение в горной промышленности на карьерах, разрезах и являются основными потребителями электрической энергии при добыче угля, руды и экскавации пород. Доля электрической энергии, потребляемой экскаваторами с электрическим приводом, составляет 20–30% от общего потребления разреза. Уменьшение удельного электропотребления и повышение энергоэффективности работы экскаваторов поз-

воляет снизить себестоимость добытой тонны угля, улучшить технико-экономические показатели разреза и повысить его конкурентоспособность на рынке. Эксплуатационная энергетическая эффективность экскаватора, характеризующаяся средним удельным расходом потребленной электрической энергии, зависит от горно-геологических, горнотехнических и климатических условий, качества подготовки забоя и горной массы; технических параметров и состояния оборудования; режимов работы и организации работ. При этом в процессе эксплуатации

необходимо планировать адекватные параметры энергопотребления экскаватора в конкретных условиях и режимах работы для стимулирования экономии электрической энергии.

В связи с изложенным актуальна задача оценки влияния технических параметров и условий работы одноковшового экскаватора на эксплуатационную энергоэффективность.

### Цель и задачи исследования

Энергоэффективность работы экскаватора определяется коэффициентом полезного действия и средним удельным расходом энергии за смену, сутки [1–6].

Коэффициент полезного действия характеризует потери энергии в отдельных механизмах экскаватора и применяется при его проектировании и сравнительном анализе энергоэффективности различных электромеханических и механических систем экскаватора [1, 7]. Согласно нормативным документам на практике [2, 3, 9, 11] основным показателем эксплуатационной энергоэффективности работы экскаватора принят средний удельный расход электрической энергии  $\omega_{\text{см}}$  за отрезок времени, равный смене. Он определяется как отношение потребленной за смену электрической энергии ( $W_{\text{см}}$ ) к объему экскавации угля, руды или породы за смену ( $Q_{\text{см}}$ ), то есть сменной производительности экскаватора:

$$\omega_{\text{см}} = W_{\text{см}} / Q_{\text{см}} \quad (1)$$

Зависимость  $\omega_{\text{см}}(Q_{\text{см}})$  определяется как энерготехнологическая характеристика и используется для количественной оценки повышения энергоэффективности работы экскаватора при применении новых технических решений и мероприятий [3, 8, 11]. В работах [8, 9, 11] представлены экспериментальные энерготехнологические характеристики экскаваторов ЭКГ8И, ЭКГ15, ЭКГ20А, фиксирующие фактическое положение с

удельным потреблением электрической энергии при работе экскаватора в конкретных условиях эксплуатации, а также установлены уравнения регрессии зависимости  $\omega_{\text{см}}(Q_{\text{см}})$ .

Оценка энергоэффективности работы экскаватора на стадии его проектирования, а также планирования и нормирования показателей его энергоэффективности при эксплуатации возможна при наличии методики их расчета. В работах [1, 4, 8] приведены методы расчета установленной мощности электрооборудования экскаваторов и отсутствуют аналитические методы определения энергетических показателей его работы, в частности, удельного расхода электроэнергии.

Прибегая к принятым методам расчета энергетических показателей экскаваторов, используют экспериментальные данные, верные для конкретных условий [7, 9, 11], либо при определении электрической энергии, потребленной электрооборудованием экскаватора, применяют общий для электрооборудования экскаватора коэффициент спроса [8], недостаточно точно характеризующий режимы его электропотребления. При этом не учитывается раздельное потребление электрической энергии экскаватором по двум каналам — электроприводом основных механизмов и электрооборудованием собственных нужд экскаватора. Кроме того, при определении удельного расхода не учитывается комплексно удельное сопротивление копанью, технические параметры — надежность, уровень технического обслуживания, а также эксплуатационные параметры режима работы экскаватора.

Цель работы разработать аналитическую методику расчета удельного расхода электрической энергии, потребленной одноковшовым экскаватором при эксплуатации, с учетом условий и режима его работы, и исследовать количественное влияние технических параметров, усло-

вий и режимов работы на его эксплуатационную энергоэффективность.

Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи исследования: разработка аналитической методики расчета эксплуатационного удельного расхода электрической энергии и энерготехнологических характеристик экскаватора; экспериментальная оценка достоверности применения методики расчета; количественная оценка влияния технических параметров и условий работы на энергоэффективность экскаватора.

### Методика расчета эксплуатационного удельного расхода энергии

Расчет эксплуатационного удельного расхода электрической энергии экскаватора включает определение эксплуатационной производительности  $Q_{см}$ , расхода электрической энергии за смену  $W_{см}$  и их отношения (1).

В данной работе на основе уравнений для теоретической ( $Q_T$ ), технической ( $Q_{тех}$ ) производительности [1, 2, 9, 13, 15–17], предложено определять эксплуатационную сменную производительность экскаватора с учетом категории породы и ее состояния, технических параметров, ее состояния и надежности экскаватора, квалификации машиниста, качества и параметров забоя, организации работ и т.д. по формуле:

$$Q_{см} = 60 \cdot E \cdot n_{ц} \cdot T_{см} \cdot K_{эк} \cdot K_3 \cdot K_{и}, \text{ м}^3/\text{см}, \quad (2)$$

где  $E$  — емкость ковша,  $\text{м}^3$ ;  $n_{ц} = 60/t_{ц}$  — число ковшей экскаватора, разгружаемых в минуту;  $t_{ц}$  — длительность цикла работы экскаватора при копании, включающая сумму длительностей черпания ( $t_{ц}$ ), поворота на выгрузку ( $t_{пр}$ ), и поворота на забой ( $t_{пз}$ );  $T_{см}$  — продолжительность сменной работы экскаватора;  $K_{эк}$ ,  $K_3$  — коэффициенты экскавации и забоя;  $K_{и}$  — коэффициент внутрисменного использования экскаватора по времени.

Коэффициент внутрисменного использования ( $K_{и}$ ) по времени экскаватора определяется по формуле:

$$K_{и} = 1 - (T_{в} + t_{ср} + t_{то} + t_{оп} + t_{дт} + t_{оз}) \cdot T_{см}^{-1} \quad (3)$$

где  $T_{в}$  — среднее время восстановления экскаватора после отказа в смену, равное  $T_{в} = (1 - K_{г}) \cdot T_{см}$ ;  $K_{г}$  — коэффициент готовности экскаватора;  $t_{ср}$  — длительность санитарно-гигиенических операций;  $t_{то}$  — длительность технического обслуживания и переналадки оборудования экскаватора;  $t_{оп}$ ,  $t_{оз}$  — длительность простоев, соответственно, организационных и из-за отказов системы внешнего электроснабжения;  $t_{дт}$  — длительность дополнительных технологических операций (планировка полки, нарез съезда и т.д.). Все параметры уравнения приведены к сменному времени работы экскаватора.

При определении расхода электрической энергии электрооборудованием экскаватора учтено, что она потребляется электроприводом основных механизмов (подъема, напора, вращения и перемещения) на разрушение и доставку горной массы в транспортное средство и электрооборудованием его вспомогательных систем — освещения, отопления, вентиляции, а также технологическим оборудованием для ремонта и технического обслуживания.

На основании анализа режимов работы электрооборудования экскаватора за смену для расчета потребляемой им электроэнергии предложена приведенная нагрузочная диаграмма электропотребления для экскаватора ЭК8И, рис. 1.

На диаграмме представлены средневзвешенные значения мощности, потребленной электрооборудованием:  $P_{пнв}$  — суммарная мощность электропривода, подъема, напора и вращения (поворота) в режиме копания;  $P_{сч1}$ ,  $P_{сч2}$  — мощность вспомогательного электрооборудования, соответственно, в режимах копания и перемещения;  $P_{п}$  — мощность

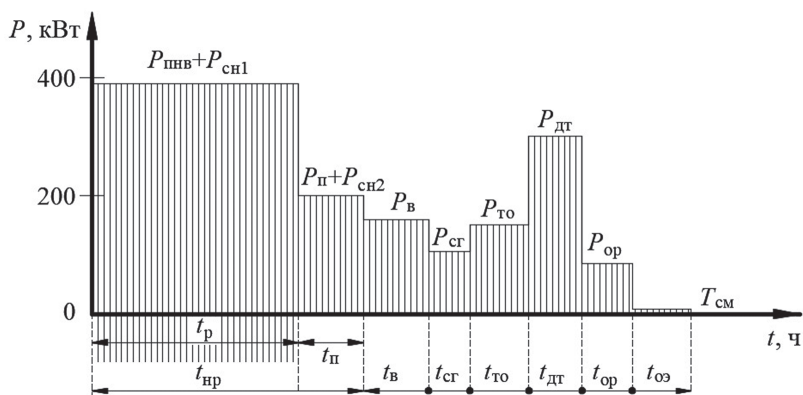


Рис. 1. Приведенная сменная нагрузочная диаграмма электропотребления электрооборудования экскаватора ЭКГ8И

Fig. 1. Reduced load diagram of power consumption by an electric equipment of an EKG8I excavator during one work shift

электропривода при перемещении экскаватора;  $P_{ср}$ ,  $P_в$ ,  $P_{то}$ ,  $P_{дт}$ ,  $P_{оп}$  — мощности вспомогательного электрооборудования, соответственно, в режимах санитарно-гигиенических процедур персонала, восстановления оборудования после отказов, технического обслуживания, выполнения дополнительных технологических операций, организационных простоев.

Электрическую энергию, потребляемую электрооборудованием экскаватора, предложено определять по формуле:

$$W_{см} = (W_{пнв} \cdot t_p \cdot t_{ц}^{-1} \cdot \eta_{пнв}^{-1} + P_n \cdot t_n \cdot \eta_x^{-1}) \cdot \eta^{-1} + (P_{сн1} \cdot t_p + P_{сн2} \cdot t_n + P_{ср} \cdot t_{ср} + P_в \cdot t_в + P_{то} \cdot t_{то} + P_{оп} \cdot t_{оп} + P_{дт} \cdot t_{дт}) \cdot \eta^{-1}, \quad (4)$$

где  $W_{пнв}$  — механическая энергия, необходимая для копания основными электроприводами экскаваторов за цикл работы;  $\eta_{пнв}$ ,  $\eta_x$ ,  $\eta_1$ ,  $\eta_2$  — соответственно, КПД электроприводов основных механизмов, привода перемещения (хода), силового трансформатора и трансформатора собственных нужд.

Механическая энергия копания за один цикл работы  $W_{пнв}$  в формуле (4) для одноковшового экскаватора определяется по зависимости суммарной механической мощности приводов основных механизмов  $P_{пнв}$  за цикл копания, которая рассчитывается на основе диаграмм

момента и скорости приводов подъема, напора, поворота (вращения) за цикл по методике [1]. При расчете учитывается механический КПД основных механизмов. Механическая энергия  $W_{пнв}$  определяется по формуле:

$$W_{пнв} = \int_0^{t_{ци}} P_M(t) \cdot dt, \quad (5)$$

или, при квантовании по времени, как алгебраическая сумма площадей между осью времени и зависимостью  $P(t)$ . На рис. 2 в качестве примера представлена упрощенная расчетная диаграмма механической мощности приводов основных механизмов экскаватора ЭКГ8И для трех значений удельного сопротивления копания:

Далее по заданным техническим режимным параметрам работы экскаватора ( $T_в$ ,  $t_{ср}$ ,  $t_{то}$ ,  $t_{оп}$ ,  $t_{дт}$ ,  $t_{оэ}$ ) и по приведенной нагрузочной диаграмме (рис. 1) определяются временные параметры диаграммы — первоначально находится приведенная суммарная длительность непрерывной работы экскаватора за смену:

$$t_{нр} = t_p + t_n = T_{см} - (T_в + t_{ср} + t_{то} + t_{оп} + t_{дт} + t_{оэ}), \quad (6)$$

затем суммарная длительность копания экскаватора в смену:

$$t_p = t_{нр} \cdot K_3 \quad (7)$$

и суммарная длительность перемещения экскаватора в смену:

$$t_n = t_{np} - t_p. \quad (8)$$

### Результаты исследования

Оценка влияния технических параметров, условий и режимов работы экскаватора на его эксплуатационную энергоэффективность производилась по его теоретическим энерготехнологическим характеристикам, полученным по уравнениям (1–8).

Влияние удельного сопротивления копания и длительности организационных простоев на эксплуатационную энергоэффективность экскаватора ЭКГ8И было оценено по рассчитанным энерготехнологическим характеристикам, представленным на рис. 3 для трех значений удельного сопротивления копания при заданных значениях режимных параметров (угол поворота на разгрузку  $90^\circ$ ,

$t_{cr} = 60$  мин,  $t_{то} = 40$  мин,  $T_v = 20$  мин,  $K = 0,96$ ) и изменении длительности организационных простоев от 8 до 30% от длительности смены (рис. 3). Производительность на рис. 3 представлена в относительных единицах  $Q^* = Q / Q_{tex}$ . Расчетные значения удельного расхода электрической энергии сравнены с экспериментальными данными, полученными при работе экскаватора ЭКГ8И в условиях разреза Восточно-Бейский ОАО «СУЭК Хакасия». Удельные сопротивления копания горной массы составляют  $(0,5–0,7) \cdot 10^5$  Па. Измерение параметров потребляемой электрической энергии, производительности и эксплуатационного удельного расхода энергии экскаватора производилось автоматической системой учета энергоресурсов, объем выборки составил 620 смен.

Из сравнения расчетных и экспериментальных данных для зависимости  $\omega(Q)$

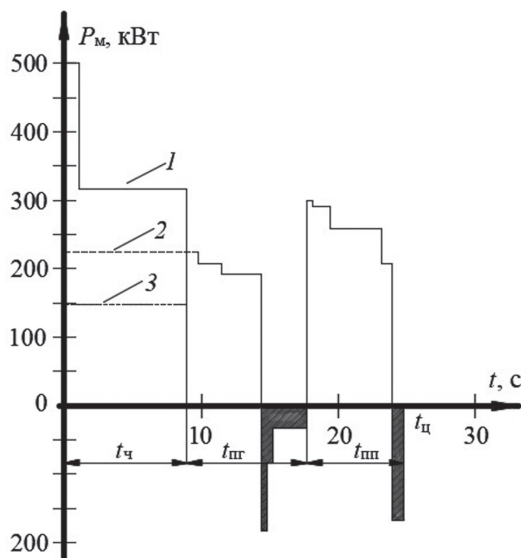


Рис. 2. Диаграмма суммарной механической мощности приводов основных механизмов за цикл копания при удельном сопротивлении копания: 1 –  $2,5 \cdot 10^5$  Па; 2 –  $1,5 \cdot 10^5$  Па; 3 –  $0,7 \cdot 10^5$  Па

Fig. 2. Diagram of total mechanical power of the drives of main mechanisms per digging cycle with a specific resistance to digging: 1 –  $2,5 \cdot 10^5$  Pa; 2 –  $1,5 \cdot 10^5$  Pa; 3 –  $0,7 \cdot 10^5$  Pa

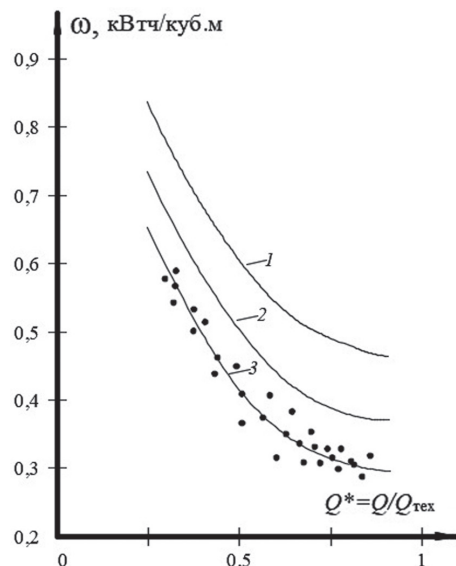


Рис. 3. Зависимости удельного расхода электрической энергии от производительности экскаватора при удельном сопротивлении копания: 1 –  $2,5 \cdot 10^5$  Па; 2 –  $1,5 \cdot 10^5$  Па; 3 –  $0,5 \cdot 10^5$  Па

Fig. 3. Dependences of specific electric energy consumption on excavator performance with specific resistance to digging: 1 –  $2,5 \cdot 10^5$  Pa; 2 –  $1,5 \cdot 10^5$  Pa; 3 –  $0,5 \cdot 10^5$  Pa

(рис. 3) следует, что точность расчета сменного удельного расхода электрической энергии по предложенной методике составляет 9–16%.

Из анализа энерготехнологических характеристик экскаватора ЭКГ8И (рис. 3) при работе с удельным сопротивлением копания от  $0,5 \cdot 10^5$  Па до  $2,5 \cdot 10^5$  Па следует: минимальное значение удельного расхода электрической энергии экскаватора имеет место при его работе с эксплуатационной производительностью в диапазоне от  $Q_{\text{тех}}$  до  $0,75 \cdot Q_{\text{тех}}$ , при этом изменение расхода составляет 3–3,5%; с уменьшением эксплуатационной производительности до  $0,5 \cdot Q_{\text{тех}}$  удельный расход резко возрастает до 28% от минимального значения; при работе экскаватора ниже  $0,25 \cdot Q_{\text{тех}}$  удельный расход электрической энергии увеличивается в два и более раза. Повышение производительности экскаватора достигается снижением длительности простоев в его работе, вызванных техническими и организационными факторами, приводящих к повышению коэффициента внутрисменного использования экскаватора (3).

Характер закономерности повышения удельного расхода электрической энергии с уменьшением производительности сохраняется и с увеличением удельного сопротивления копания.

Оценка влияния длительности технологического обслуживания  $t_{\text{то}}$ , дополнительных операций  $t_{\text{дт}}$ , санитарно-гигиенических операций  $t_{\text{сг}}$  на энергоэффективность работы экскаватора показала, что с увеличением этих параметров снижается эксплуатационная производительность и повышается удельный расход электрической энергии за смену. Энерготехнологические характеристики в указанных случаях имеют гиперболический характер и соответствуют виду кривых, представленных на рис. 3.

Установлено, что повышение надежности экскаватора ЭКГ8И, оцениваемое

увеличением коэффициента готовности с 0,8 до 0,96, приводит к снижению удельного расхода электрической энергии по линейному закону на 9,5%. Выявлено, что применение в качестве электропривода основных механизмов экскаватора частотно-регулируемого асинхронного электропривода взамен системы постоянного тока «генератор-двигатель» приводит к снижению среднего эксплуатационного удельного расхода электрической энергии экскаваторам на 20–25%.

### Заключение

Таким образом, поставленная цель работы по оценке влияния технических параметров, условий и режимов работы одноковшового экскаватора на его эксплуатационную энергоэффективность, характеризующую эксплуатационным удельным расходом электрической энергии, выполнена.


Разработана аналитическая методика расчета эксплуатационного удельного расхода электрической энергии и энерготехнологических характеристик экскаватора, отличающаяся учетом одновременного потребления электрической энергии основным и вспомогательным оборудованием и коэффициентом полезного действия элементов электрооборудования.

В результате исследований энерготехнологических характеристик экскаватора установлено, что при его работе с производительностью выше 75% от технической производительности эксплуатационный удельный расход электрической энергии имеет минимальное значение и с уменьшением производительности ниже указанной величины резко возрастает. Оценка влияния технических параметров экскаватора на его эксплуатационную энергоэффективность показала, что повышение коэффициента готовности экскаватора с 0,8 до 0,96 снижает эксплуатационный удельный расход

электрической энергии экскаватора до 9,5%, а применение частотно-регулируемого асинхронного электропривода вместо системы «генератор-двигатель постоянного тока» для основных механизмов экскаватора снижает эксплуатационный удельный расход электрической энергии на 20–25%.

Результаты исследований позволяют аналитически оценить эксплуатационную энергоэффективность работы одноковшового экскаватора при проектировании, объективно с учетом условий и режимов его работы планировать и нормировать его энергетические показатели при эксплуатации.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Подэрни Р. Ю. Механическое оборудование карьеров. — М.: Изд-во МГГУ, 2007. — 680 с.
2. Комиссаров Л. П., Летунова Ю. А., Лукашук О. А., Телиман И. В. Обоснование рабочей характеристики карьерного экскаватора // Горное оборудование и электромеханика. — 2017. — № 2. — С. 31–35.
3. Петухов С. В., Ляхомский А. В., Кузнецов А. Н. Энерготехнологические профили экскаваторных работ при разработке угольных месторождений // Горное оборудование и электромеханика. — 2017. — № 6. — С. 11–16.
4. Levesque M., Millar D., Paraszczak J. Energy and mining — the home truths // Journal of Cleaner Production. 2014. DOI: 10.1016/j.jclepro. 2013.12.088.
5. Малафеев С. И., Малафеев С. С., Серебренников Н. А. Моделирование энергетических процессов в механических системах одноковшовых экскаваторов // Горное оборудование и электромеханика. — 2011. — № 5. — С. 24–29.
6. Малафеев С. С. Повышение энергетической эффективности работы электроприводов мехатронных карьерных машин с дистанционно-автоматическим управлением. Диссертация на соискание степени кандидата техн. наук. — М., 2012. — 200 с.
7. Bise C. J. Modern American coal mining: methods and application. Published by SME // Society for Mining, metallurgy and exploration, Inc. 2013. 576 p.
8. Casson M. Dragline for AC motion power / SYMPOHS 2013. 2nd International Symposium on Innovation and Technology in the Phosphate // Procedia Engineering, 2014.09.07. No 83. Pp. 86–89. DOI: 10.1016/j.proeng. 2014.09.07.
9. Камалов Т. С., Тоиров О. З. Методика нормирования удельных расходов электрической энергии и энергоэффективности карьерных экскаваторов // Проблемы информатики и энергетики. — 2012. — № 3–4. — С. 83–92.
10. Козярук А. Е., Васильев Б. Ю. Методы и средства повышения энергоэффективности машин и технологий с асинхронными электроприводами // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Энергетика. — 2015. — С. 115–120.
11. Стефанов В. К., Игумнова С. А., Антоненков Д. В. Удельный расход электрической энергии карьерных экскаваторов работающих в условиях крайнего Севера // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2011. — № 6. — С. 18–21.
12. Козярук А. Е. Направления повышения энергоэффективности эксплуатации экскаваторно-автомобильных комплексов на открытых горных работах // Горное электрооборудование и электромеханика. — 2014. — № 1. — С. 6–11.
13. Komissarov A. P., Lagunova Y. A., Lukashuk O. A. Evaluation of Single bucketed excavators energy consumption // Procedia Engineering, 2016, vol. 150, pp. 1221–1226.
14. ГОСТ Р 5154-2000. Энергосбережение. Энергоэффективность. Состав показателей. Общие положения.
15. Minav T., Hanneinen H., Sinkkonen A., Lauria L. Electric or hydraulic energy recovery systems in a reach truck — a comparison // Journal of mechanical engineering. 2014. Vol. 60. No 4, pp. 232–240. DOI: 10.5545/sv-jme. 2013. 576 p.
16. Zweiri Y. H., Seneviratne L. D., Althoefer K. Parameter estimation arm using generalised newton method // IEEE Trans No. 4. August 2004. Pp. 762–767.
17. Yoo W. S., Kim O. J. Estimation of maximum lifting load capacities of a exavatorvia multibondy comput KSME // International Journal. 2008. Vol. 12. No. 6. Pp. 1000–1096.
18. Фашиленко В. Н., Решетняк С. Н. Исследование резонансного режима работы электропривода горных машин // Горный журнал. — 2017. — № 7. — С. 80–83. 



## REFERENCES

1. Poderni R.Yu. *Mekhanicheskoe oborudovanie kar'еров* [Mechanical equipment of quarries], Moscow, Izd-vo MGGU, 2007, 680 p.
2. Komissarov L.P., Letunova Yu.A., Lukashuk O.A., Teliman I.V. Justification of the working characteristics of a career excavator. *Gornoe oborudovanie i elektromekhanika*. 2017, no 2, pp. 31–35. [In Russ].
3. Petukhov S.V., Lyakhomskiy A.V., Kuznetsov A.N. Energy technology profiles of excavation work in the development of coal deposits. *Gornoe oborudovanie i elektromekhanika*. 2017, no 6, pp. 11–16.
4. Levesque M., Millar D., Paraszczak J. Energy and mining – the home truths. *Journal of Cleaner Production*. 2014. DOI: 10.1016/j.jclepro.2013.12.088.
5. Malafeev S.I., Malafeev S.S., Serebrennikov N.A. Modeling of energy processes in mechanical systems of single-bucket excavators. *Gornoe oborudovanie i elektromekhanika*. 2011, no 5, pp. 24–29. [In Russ].
6. Malafeev S.S. *Povyshenie energeticheskoy effektivnosti raboty elektroprivodov mekhatronnykh kar'ernykh mashin s distantsionno-avtomaticheskim upravleniem* [Increasing the energy efficiency of electric drives of mechatronic quarry machines with remote-automatic control], Candidate's thesis, Moscow, 2012, 200 p.
7. Bise C.J. *Modern American coal mining: methods and application*. Published by SME. *Society for Mining, metallurgy and exploration, Inc.* 2013. 576 p.
8. Casson M. Dragline for AC motion power / SYMPOHS 2013. 2nd International Symposium on Innovation and Technology in the Phosphate. *Procedia Engineering*, 2014.09.07. No 83. Pp. 86–89. DOI: 10.10.16/j.proeng.2014.09.07.
9. Kamalov T.S., Toirov O.Z. Methods of rationing the specific consumption of electrical energy and energy efficiency of mining excavators. *Problemy informatiki i energetiki*. 2012, no 3–4, pp. 83–92. [In Russ].
10. Kozyaruk A.E., Vasil'ev B. Yu. Methods and means of improving the energy efficiency of machines and technologies with asynchronous electric drives. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Energetika*. 2015, pp. 115–120. [In Russ].
11. Stefanov V.K., Igumnova S.A., Antonenkov D.V. Specific consumption of electrical energy of career excavators working in the conditions of the Far North. *Gornyy informatsionno-analiticheskyy byulleten'*. 2011, no 6, pp. 18–21. [In Russ].
12. Kozyaruk A.E. Directions for improving the energy efficiency of operation of excavator-automotive complexes in open pit mining. *Gornoe elektrooborudovanie i elektromekhanika*. 2014, no 1, pp. 6–11. [In Russ].
13. Komissarov A.P., Lagunova Y.A., Lukashuk O.A. Evaluation of Single bucketed excavators energy consumption. *Procedia Engineering*, 2016, vol. 150, pp. 1221–1226.
14. *Energosberezhenie. Energoeffektivnost'. Sostav pokazateley. Obshchie polozheniya. GOST R 5154-2000* [Energy saving. Energy efficiency. The composition of the indicators. General provisions. State Standart R 5154-2000].
15. Minav T., Hanneinen H., Sinkkonen A., Lauria L. Electric or hydraulic energy recovery systems in a reach truck – a comparison. *Journal of mechanical engineering*. 2014. Vol. 60. No 4, pp. 232–240. DOI: 10.5545/sv-jme.2013.576 p.
16. Zweiri Y.H., Seneviratne L.D., Althoefer K. Parameter estimation arm using generalised newton method. *IEEE Trans* No. 4. August 2004. Pp. 762–767.
17. Yoo W.S., Kim O.J. Estimation of maximum lifting load capacities of an excavator via multibody comput KSME. *International Journal*. 2008. Vol. 12. No. 6. Pp. 1000–1096.
18. Fashchilenko V.N., Reshetnyak S.N. The study of the resonant mode of the electric drive of mining machines. *Gornyy zhurnal*. 2017, no 7, pp. 80–83. [In Russ].

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Бабочкин Геннадий Иванович — д-р техн. наук, профессор,  
e-mail: babokinginov@yandex.ru, НИТУ «МИСиС».

## INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

G.I. Babokin, Dr. Sci. (Eng.), Professor, e-mail: babokinginov@yandex.ru,  
National University of Science and Technology «MISIS», 119049, Moscow, Russia.