УДК 622.235

ЭНЕРГОЕМКОСТЬ ПОГРУЗКИ ГОРНОЙ МАССЫ В ТРАНСПОРТНЫЕ СРЕДСТВА ОДНОКОВШОВЫМ ЭКСКАВАТОРОМ

А. И. Крючков, канд. техн. наук, Л. И. Евтеева, инж. (НТУУ «КПИ»)

Викладена методика розрахунку продуктивності та енергоємності вантаження підірваної гірничої маси в засоби автотранспорту екскаватором типу мехлопата по операціях технологічного циклу. Результати аналітичних розрахунків перевірені експериментально в умовах кар'єру при завантаженні гірничої маси в автосамоскиди екскаватором ЕКГ-5А з достатньою збіжністю розрахункових і експериментальних даних.

Ключові слова: гірнича маса, екскавація, кар'єр, методика, параметри, енергоємність, продуктивність.

Изложена методика расчета производительности и энергоемкости погрузки взорванной горной массы в средства автотранспорта экскаватором типа мехлопата по операциям технологического цикла. Результаты аналитических расчетов проверены экспериментально в условиях карьера при погрузке горной массы в автосамосвалы экскаватором ЭКГ-5А с достаточной сходимостью расчетных и экспериментальных данных.

Ключевые слова: горная масса, экскавация, карьер, методика, параметры, энергоемкость, производительность.

The design procedure of productivity and power consumption of loading of the blasted mined rock into transport means by the power shovel on operations of technological cycle is considered. Results of analytical calculations have been experimentally tested under mine conditions at loading mined rock into dumpers by the power-shovel of EKG-5A with sufficient convergence of calculation and experimental data.

Keywords: mined rock, excavating, open-cast mine, design procedure, parameters, power consumption, productivity.

Введение. Энергоемкость технологических процессов и связанного с ними горного оборудования при разработке месторождений полезных ископаемых в различных отраслях промышленности оценивается универсальным критерием – величиной удельных энергозатрат [1]. Очевидно, что этот показатель в общей совокупности процессов на предприятиях должен иметь минимальную величину.

В Украине значительный объем мягких грунтов и скальных пород при экскавации месторождений разрабатывается одноковшовыми экскаваторами типа мехлопата. При этом используемые технология и тип экскаваторов во многом определяют организацию выемочно-погрузочных работ, их

производительность и экономические показатели. В свою очередь удельное энергопотребление экскаваторных работ при погрузке горной массы в транспортные средства зависит от ряда факторов: физико-механических свойств разрушаемых пород; их гранулометрического состава и геометрических параметров развала горной массы; параметров разрабатываемого уступа в случае мягких грунтов.

Неудовлетворительное дробление горной массы приводит к снижению производительности копания и увеличению удельных энергозатрат экскаватора за счет продолжительности рабочего цикла, уменьшения коэффициента экскавации и повышения износа рабочего оборудования. Поэтому при проектировании и производстве взрывных работ качественное дробление пород, определяемое величиной среднего диаметра куска $d_{ср}$, должно обеспечиваться за счет нормированного удельного расхода взрывчатого вещества q как показателя максимальной энергонасыщености горного массива [2]. Для подтверждения статистического соответствия между энергией, передаваемой горному массиву в процессе его разрушения, и качеством его дробления по результатам обработки данных [1] установлены зависимости $d_{ср} = f(q)$ для условий открытых и подземных горных работ (рис. 1).

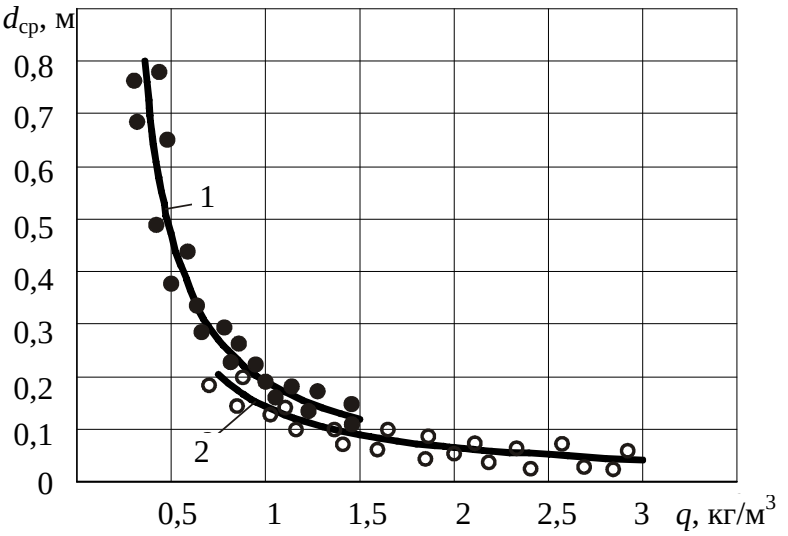


Рис. 1. Зависимость изменения среднего диаметра куска $d_{ср}$ от удельного расхода ВВ q: *1* – открытые горные работы; *2* – подземные горные работы

Из анализа рисунка следует, что указанные показатели изменяются в широком диапазоне: для открытых работ величина q изменяется от 0,4 до 1,5 кг/м^3 при $d_{ср}$ от 0,1 до 0,8 м; для подземных работ величина q изменяется от 0,55 до 3,0 кг/м^3. Эти данные косвенно свидетельствуют и о большом диапазоне изменения удельной энергоемкости процесса экскавации.

Возможность прогнозирования, нормирования и планирования производительности и энергоемкости процесса экскавации является важнейшим требованием при организационно-информационном обеспечении

комплекса горных работ, а разработка методик, обеспечивающих эту возможность, является актуальной практической и научной задачей.

Зависимости $d_{\text{ср}} = f(q)$ для открытых и подземных горных работ апроксимируются соответственно следующими уравнениями [1]:

$$d_{\text{ср}}^{\text{о}} = 0{,}12/(q - 0{,}16);$$

$$d_{\text{ср}}^{\text{п}} = 0{,}16/(q - 0{,}16).$$

Установлено, что значительные расхождения между действующими расчетными нормативными и фактическими значениями производительности и энергоемкости погрузки горной массы экскаваторами типа мехлопата объясняются слабым соответствием математических моделей для определения этих показателей реальным условиям процесса. Это сказывается на адекватности и достоверности инженерных методик, базирующихся на известных моделях. Более адекватные модели получены исходя из фундаментальных научных принципов, что требует детальной проработки методики расчета производительности копания экскаватора и определения энергоемкости этого процесса.

Цель работы – обоснование зависимостей производительности и энергоемкости копания экскаватора типа мехлопата для расчета этих показателей, соответствующих реальным условиям.

Результаты исследования. Оптимизация показателей пород ожидаемой производительности экскаваторов типа мехлопата, энергоемкости экскавации, себестоимости выемочно-погрузочных работ возможна лишь при наличии научно обоснованной классификации горных пород по степени их сопротивления экскавации. Для этой цели разработаны классификации, учитывающие удельное сопротивление копанию K_F, удельную силу резания $m_{\text{СВ}}$, тип грунтов и взорванных пород, относительный показатель трудности экскавации пород и удельную энергоемкость погрузки взорванной породы [1–6]. Наиболее универсальной является классификация, приведенная в работе [1], в основу которой положены затраты энергии на черпание горной массы, поворот и разгрузку ковша экскаватора, то есть все процессы экскавации. Однако использование этих классификаций на практике не позволяет выполнять с единых позиций достаточно достоверные расчеты производительности черпания и энергетических затрат.

Классификация грунтов и скальных пород, разработанная авторами на основе аналитико-экспериментальных исследований [7], не противоречит основным принципам известных классификаций [5], но учитывает показатель удельной энергоемкости копания (черпания) $e_{\text{м}}$ породы ковшом экскаватора. При наличии информации о категории грунтов или трещиноватых полускальных и скальных пород теоретическая удельная энергоемкость копания массива $e_{\text{м}}$ (МДж/м^3) определяется по разработанной классификации или по выражению

$$e_{\text{м}} = 0{,}0094 \exp(K/1{,}5), \tag{1}$$

где $K = 1…6$ – показатель категории пород по трудности экскавации.

При отсутствии информации о категории грунтов величина $e_{\text{м}}$ (теоретическая) определяется по одному или нескольким показателям, корреляционно связанных с энергоемкостью. Простейшим показателем в этом случае является сцепление грунтов или горных пород в массиве $C_{\text{м}}$. Тогда для грунтовых массивов теоретическая энергоемкость копания рассчитывается по выражению

$$e_{\text{мг}} = 0{,}0094 \exp(2{,}55 + 1{,}42 \ln C_{\text{м}}). \tag{2}$$

При этом величина $C_{\text{м}}$ (МПа) определяется экспериментально с помощью прибора для испытания грунтов на одноплоскостной срез.

Теоретическая энергоемкость копания полускальных и трещиноватых скальных пород в массиве определяется через сцепление в куске $C_{\text{к}}$, которое рассчитывается по результатам испытаний образца на прочность (МПа) при одноосном сжатии $\left(\sigma_{\text{с}}^{*}\right)$ и растяжении $\left(\sigma_{\text{р}}^{*}\right)$:

$$C_{\text{к}} = \sigma_{\text{р}}^{*}\left(\sqrt{\sigma_{\text{с}}^{*}/\sigma_{\text{р}}^{*} + 1} - 1\right). \tag{3}$$

Влияние трещиноватости массива на энергоемкость черпания учитывается через изменение сцепления горных пород $C_{\text{м}}$. На карьерах величина $C_{\text{м}}$ меньше в несколько раз по сравнению со сцеплением в куске $C_{\text{к}}$ и определяется по выражению

$$C_{\text{м}} = \exp\left[\ln C_{\text{к}} + 0{,}92 \ln\left(L_{\text{ср}}/2{,}2\right)\right], \tag{4}$$

где $L_{\text{ср}}$ – среднее расстояние между трещинами в массиве, м.

Для трещиноватых и скальных пород в массиве

$$C_{\text{мс}} = \exp(0{,}455 + 0{,}75 \ln C_{\text{м}}). \tag{5}$$

Процесс экскавации взорванных горных пород, в отличие от выемки трещиноватых пород, имеет следующие особенности:

в сыпучих и вязкосыпучих породах черпание горной массы осуществляется при блокированной схеме;

черпание взорванной горной массы сопровождается периодическим осыпанием и обрушением породы из средней и верхней частей забоя;

меняется угол встречи передней кромки ковша с разрабатываемой горной массой вследствие специфики траектории движения ковша экскаватора и непостоянства угла откоса забоя.

При выемке и погрузке взорванной горной массы энергоемкость черпания зависит от ее гранулометрического состава, коэффициента разрыхления, объема ковша и режима черпания горной массы.

Влияние гранулометрического состава на энергоемкость черпания взорванных скальных или трещиноватых скальных пород учитывается функцией η_d через диаметр среднего куска $d_{ср}$ (м), которая рассчитывается по формуле

$$\eta_d = 0{,}4 + d_{ср} / 0{,}34. \quad (6)$$

С увеличением коэффициента разрыхления горной массы $K_р$ энергоемкость черпания уменьшается. Величина $K_р$ определяется фотопланометрическим или расчетным методами с учетом изменения его по объему развала взорванной горной массы. Приближенно $K_р$ определяется через $d_{ср}$ по формуле:

$$K_р = 1 + d_{ср}. \quad (7)$$

Функция $\eta_р$, учитывающая влияние коэффициента разрыхления массива на энергоемкость черпания, рассчитывается по выражению

$$\eta_р = \exp[-(K_р - 1)/ 0{,}92]. \quad (8)$$

Влияние на энергоемкость копания объема ковша и режима копания необходимо учитывать при расчете скорости и производительности копания для конкретного типа экскаватора. Функции η_E и η_h, учитывающие влияние на энергоемкость копания объема ковша экскаватора E (м^3) и глубины копания h (м), определяется соответственно по формулам

$$\eta_E = 1{,}23 - 0{,}14\sqrt[3]{E}; \quad (9)$$

$$\eta_h = 0{,}92 + 0{,}03 / h. \quad (10)$$

Расчетная техническая удельная энергоемкость копания ковшом экскаватора (МДж/м^3) для различных технических и технологических условий определяется по одному из следующих выражений:

для грунтов

$$e_{Fг} = e_г \cdot \eta_E \cdot \eta_h \quad (11)$$

для полускального и скального трещиноватого массива

$$e_{Fс} = e_с \cdot \eta_E \cdot \eta_h \cdot \eta_d; \quad (12)$$

для взорванной горной массы

$$e_{мг} = e_{мс} \cdot \eta_d \cdot \eta_p \cdot \eta_E \cdot \eta_h. \quad (13)$$

Изменение энергоемкости, а следовательно, и производительности экскавации взорванной горной массы в процессе погрузки ее в автомобильный транспорт было проверено в условиях Михайловского разреза [8]. В процессе наблюдений за работой экскаватора ЭКГ-5А при определении действительных режимов управления электроприводами подъема, поворота и напора

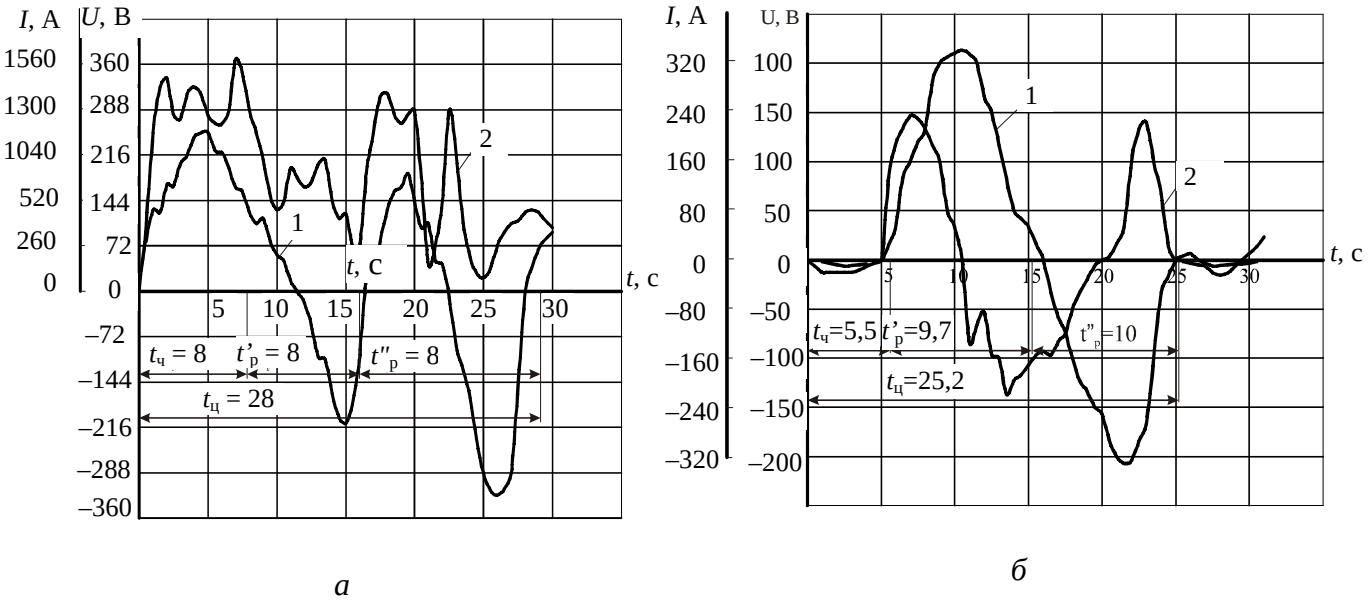
производилась запись следующих показателей тока и напряжения: от двигателя и генератора поворота; двигателя и генератора напора; тока двигателей напора и подъема; временные характеристики по операциям цикла (черпание, поворот ковша на разгрузку, непосредственно разгрузка, поворот пустого ковша к забою).

Продолжительность рабочего цикла ($t_ц$, с) в целом определялось по формуле: $t_ц = t_ч + t_р + 2t_п$, где, $t_ч$, $t_р$, $t_п$ – время соответственно на черпание, разгрузку и поворот.

Результаты хронометражных наблюдений заносились в специальный журнал для последующей обработки.

На основании выборок и полученных временных данных составлялись ряды распределения продолжительности рабочих циклов и абсолютной частоты их распределения. По этим данным строились гистограммы распределения продолжительности рабочих циклов. Для рассматриваемых горно-технологических условий установлены среднестатистическая и наиболее часто повторяющаяся продолжительность цикла, равная 28 с (продолжительность черпания $t_ч$ и поворота $t_п$ – по 8 с, разгрузки $t_р$ ковша – 12 с).

Характерные диаграммы напряжения (U, В) и тока (I, А) при работе приводов подъема и поворота для наиболее часто повторяющегося цикла показаны на рис. 2. Изменения этих характеристик по операциям рабочего цикла в процессе работы экскаватора детально рассмотрены в работе [8].



а *б*

Рис. 2. Диаграммы напряжения (*1*) и тока (*2*) двигателей подъема (*а*) и поворота (*б*) при погрузке горной массы экскаватором ЭКГ-5А в автосамосвалы

Анализ результатов дробления скальных пород массовыми взрывами с увеличенным удельным расходом ВВ q_1 = 1,1…1,3 кг/м^3 показал, что с принятыми на предприятии параметрами буровзрывных работ при удельном расходе ВВ q_2 = 0,8…0,95 кг/м^3 диаметр среднего куска $d_{ср}$ горной массы уменьшается на 17 %, а выход мелких фракций размером 200 мм увеличивается

на 11 %. Так, например, при $d_{ср}$ = 200 мм величина $П$ (при q_1 по сравнению с q_2) увеличивается на 200 т/ч, а при $d_{ср}$ = 350 мм – на 180 т/ч. Энергоемкость процесса экскавации e горной массы при этом в среднем снижается в 1,6 раза (рис. 3).

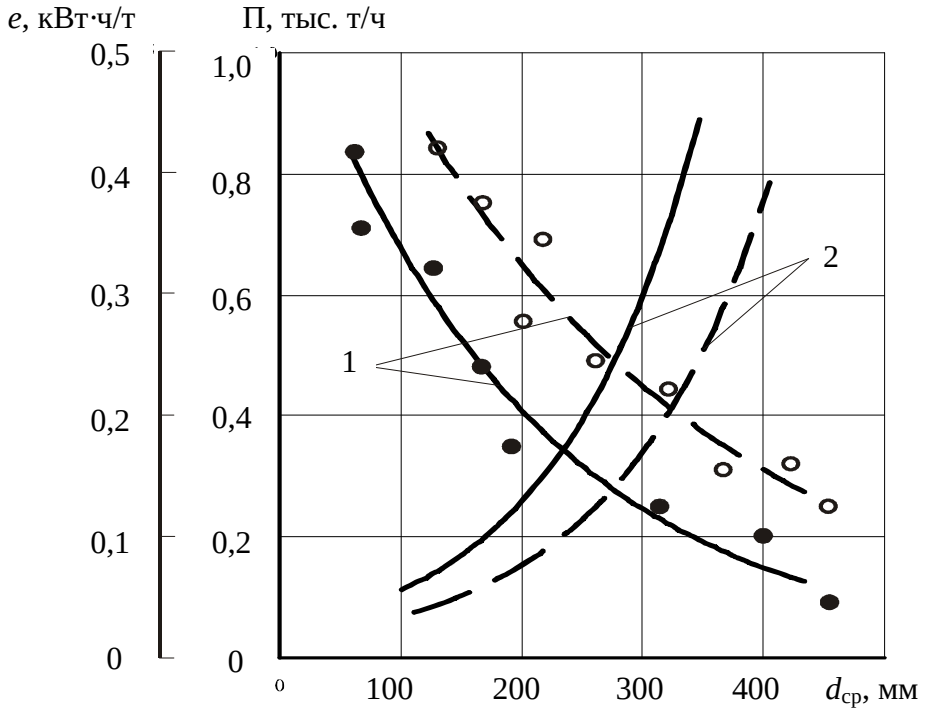


Рис. 3. Зависимость производительности (*1*) и энергоемкости (*2*) экскавации горной массы от диаметра среднего куска при удельном расходе ВВ 0,8…0,95 кг/м^3 (сплошная линия) и 1,1…1,3 кг/м^3 (пунктирная линия)

Результаты замеров производительности и энергоемкости копания в сопоставления с рассчитанными по предлагаемой методике приведены на рис. 3. Как видим, достаточное совпадение результатов эксперимента и расчета подтверждает возможность использования предлагаемой методики при проектировании и планировании экскавационных работ.

Выводы

Предложенная методика расчета производительности и энергоемкости копания экскаватора типа мехлопата, разработанная на основании аналитико-экспериментальных исследований, позволяет определять аналитическим путем следующие параметры:

показатель категории экскавируемости грунтов, полускальных и трещиноватых скальных пород на основании стандартных замеров их прочностных свойств;

теоретическую удельную энергоемкость разрушения массива горной породы в соответствии с категорией (2), (5);

техническую удельную энергоемкость разрушения массива ковшом экскаватора в процессе копания (черпания) с учетом влияния коэффициента

разрыхления массива, толщины снимаемой стружки, гранулометрического состава взорванных пород, объема ковша и других факторов (11), (12), (13);

технологическую удельную энергоемкость копания горных пород;

скорость копания и производительность копания (черпания) экскаватора.

Результаты аналитических расчетов показателей процесса экскавации горной массы подтверждены экспериментальными данными по изменению производительности П и энергоемкости $e = f(d_{ср})$, что согласуется с современными подходами по данному направлению.

1. *Тангаев И. А.* Энергоемкость процессов добычи и переработки полезных ископаемых. – М.: Недра, 1986. – 231 с.

2. *Влияние дробления пород* на энергоемкость технологических процессов открытой разработки / М. Ф. Друкованый, Б. Н. Тартаковский, В. С. Вислиянов, Э. И. Ефремов. – К.: Наук. думка, 1974. – 271 с.

3. *Домбровский Н. Г.* Экскаваторы. – М.: Машиностроение 1969. – 236 с.

4. *Ветров Ю. И.* Резание грунтов землеройными машинами. – М.: Машиностроение 1971. – 183 с.

5. *Беляков Ю. И., Владимиров В. М.* Совершенствование экскаваторных работ на карьерах. – М.: Недра, 1974. – 295 с.

6. *Ржевский В. В.* Открытые горные работы. Производственные процессы. – М.: Недра, 1985. – 479 с.

7. *Воробьев В. Д., Крючков А. И., Евтеева Л. И.* Аналитический метод определения производительности и энергоемкости процесса копания экскаватора типа мехлопата // Сучасні ресурсоенергозберігаючі технології гірничого виробництва. – 2009. – Вип. № 1/2009(3). – С. 26–34.

8. *Разработка научного обоснования* проектов экологически безопасных горных предприятий по добыче и переработке строительных материалов: Отчет по НИР (заключ.) / КПИ; № ГР 0193И027015. – К.: КПИ, 1994. – 195 с.