

## АНАЛИТИЧЕСКИЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ И ЭНЕРГОЕМКОСТИ ПРОЦЕССА КОПАНИЯ ЭКСКАВАТОРА ТИПА ЭКГ

*А. И. Крючков, канд. техн. наук (НТУУ «КПИ»)*

*Наведено елементи методики розрахунку продуктивності та енергоємності процесу копання (черпання) екскаваторів типу ЕКГ. Запропонована методика необхідна для раціонального вибору типорозміру екскаватора та параметрів процесів виїмково-навантажувальних робіт при проектуванні та експлуатації кар'єрів по видобутку будівельних матеріалів.*

**Введение.** Принятая технология и тип экскаваторного оборудования во многом определяют организацию выемочно-погрузочных работ на карьерах, их производительность, энергетические и экономические показатели всего технологического комплекса. На Украине месторождения полускальных и скальных пород эффективно разрабатываются с применением карьерных мехлопат типа ЭКГ. При этом возможность прогнозирования, нормирования и планирования производительности основных технологических процессов является важнейшим элементом в организационно-информационном обеспечении комплекса горных работ, а разработка методик, обеспечивающих эту возможность, является актуальной производственной и научной задачей.

Предлагаемая методика основана на комплексе динамических стохастических моделей процесса копания и результатах экспериментальных исследований автора и других исследователей. Отличительной особенностью разработанной методики является определение основных параметров копания, которые базируются на показателе удельной энергоёмкости копания (черпания) грунта или скальных пород ковшом экскаватора с учетом конкретного режима работы привода.

**1. Экскавируемость грунтов и скальных пород.** Достоверное определение ожидаемой производительности экскаваторов, энергоёмкости экскавации, себестоимости выемочно-погрузочных работ возможно лишь при наличии научно обоснованной классификации грунтов и скальных пород по степени их сопротивления экскавации.

Применительно к экскаваторам типа мехлопата первая классификация грунтов предложена Н. Г. Домбровским (1940) по величине удельного сопротивления копанию  $K_f$ . В 1958 г. Ю. А. Ветров предложил классификацию грунтов по величине  $m_{св}$  – удельной силе резания для преодоления сопротивления грунтов передней гранью ножа при угле резания  $45^\circ$ .

Классификации Н. Г. Домбровского–Ю. И. Беякова (1968, 1972) учитывают тип грунта, тип взорванных скальных пород, то есть достаточно универсальны.

Классификации В. В. Ржевского (1974) по экскавируемости как грунтовых массивов, так и разрушенных скальных пород содержат 10 категорий, которые характеризуются относительным показателем трудности экскавации пород ( $\Pi_3$ ).

Важным шагом в классификации горных пород по экскавируемости явилась классификация И. А. Тангаева (1986) по удельной энергоёмкости погрузки взорванной горной массы, хотя в этой классификации включены затраты энергии как на черпание горной массы, так и на поворот и разгрузку ковша.

Перечисленные классификации не противоречат друг другу и практически охватывают весь диапазон грунтов и скальных пород, встречающихся в практике открытых разработок.

Предлагаемая в статье классификация грунтов и скальных пород сохраняет принципы, заложенные в классификации Домбровского–Белякова, однако в основу этой классификации положен не показатель удельного сопротивления копанью  $K_F$ , а, как и в классификации И. Н. Тангаева, показатель удельной энергоёмкости копания (черпания) породы ковшом экскаватора  $e_m$ . Это позволяет выполнять с единых позиций расчет производительности черпания и энергетические расчеты (табл. 1).

Таблица 1. Классификация грунтов, полускальных и трещиноватых скальных пород по теоретической удельной энергоёмкости копания (черпания)

| Категория | Энергоёмкость $l_m$ , МДж/м <sup>3</sup> | Группы грунтов и пород   | Грунты, породы   | Сцепление в массиве $C_m$ , МПа |
|-----------|--|--|--|---------------------------------|
| I         | 0,018...0,036                            | Мягкие и рыхлые грунты   | Сухой песок  | 0,010...0,016                   |
| II        | 0,036...0,069                            |  | Песок влажный, супесь, суглинок мягкий   | 0,016...0,026                   |
| III       | 0,069...0,135                            | Уплотненные грунты. Грунт II категории при промерзании   | Суглинок без включений, гравий мягкий и средний, глина мягкая  | 0,026...0,04                    |
| IV        | 0,135...0,26                             | Плотные и очень плотные грунты. Грунт III категории при промерзании                                | Суглинок крепкий, глина средней крепости и крепкая, алевролиты и аргиллиты, угли слабые и средней крепости | 0,04...0,10                     |
| V         | 0,26...0,51                              | Малопрочные полускальные породы. Сильно трещиноватые руды. Грунты IV категории при промерзании     | Сланцы, конгломераты, уголь средней крепости, мел, гипс  | 0,10...0,24                     |
| VI        | 0,51...1,0                               | Прочные полускальные породы и сильно трещиноватые тяжелые руды. Породы V категории при промерзании | Ракушечники, сланцы, крепкий уголь, мягкие песчаники, трещиноватые руды                                    | 0,24...0,55                     |

При наличии информации о категории грунтов или трещиноватых полускальных и скальных пород теоретическая удельная энергоёмкость копания  $e_m$ , МДж/м<sup>3</sup>, определяется по табл. 1 или по выражению

$$e_m = 0,0094 \exp(K/1,5), \quad (1)$$

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

**2 Теоретическая энергоёмкость копания грунтов.** При отсутствии информации о категории грунтов теоретическая энергоёмкость определяется по одному или нескольким показателям, корреляционно связанным с энергоёмкостью. Таким простейшим показателем является сцепление грунтов или горных пород в массиве  $C_m$ .

Для грунтовых массивов со сцеплением  $C_m$ , МПа, теоретическая удельная энергоёмкость копания  $e_t$ , МДж/м<sup>3</sup>, определяется по формуле

$$e_t = 0,0094 \exp(2,55 + 1,42 \ln C_m). \quad (2)$$

Сцепление грунтов в массиве определяется экспериментально с помощью прибора для испытаний грунтов на одноплоскостной срез.

**3 Теоретическая энергоёмкость копания полускальных и трещиноватых скальных пород.** Энергоёмкость копания полускальных и трещиноватых скальных пород в массиве определяется через сцепление в куске, которое, в свою очередь, рассчитывается по данным испытаний образца на прочность при одноосном сжатии  $\sigma_c^*$  и одноосном растяжении  $\sigma_p^*$ :

$$C_k = \sigma_p^* \left( \sqrt{\sigma_c^* / \sigma_p^*} + 1 - 1 \right). \quad (3)$$

Влияние трещиноватости массива на энергоёмкость черпания учитывается через изменение сцепления горных пород. Сцепление неоднородного и трещиноватого массива  $C_m$  на карьерах снижается в несколько раз по сравнению со сцеплением в куске  $C_k$ . Это снижение учитывается с помощью коэффициента ослабления  $\eta_t$  (табл. 2):

$$\eta_t = C_m / C_k. \quad (4)$$

Таблица 2. Ослабление сцепления трещиноватого массива

| Категория пород по трещиноватости | Среднее расстояние между трещинами $L_{cp}$ , м | Удельная трещиноватость, 1/м | Коэффициент ослабления сцепления $\eta_t$ |
|-----------------------------------|---|------------------------------|---|
| I                                 | <0,1  | >10                          | <0,05                                     |
| II                                | 0,1...0,5                                       | 10...2                       | 0,05...0,25                               |
| III                               | 0,5...1,0                                       | 2...1                        | 0,25...0,50                               |
| IV                                | 1,0...1,5                                       | 1...0,65                     | 0,50...0,75                               |
| V                                 | >1,5  | <0,65                        | >0,75                                     |

Тогда сцепление в массиве  $C_M$  определяется с учетом его трещиноватости по выражению

$$C_M = \exp [\ln C_K + 0,92 \ln (L_{cp} / 2,2)], \quad (5)$$

где  $L_{cp}$  – среднее расстояние между трещинами в массиве, м.

Теоретическая удельная энергоёмкость копания трещиноватых полускальных и скальных пород в массиве  $e_c$ , МДж/м<sup>3</sup>, рассчитывается по выражению

$$e_c = \exp (0,455 + 0,75 \ln C_M). \quad (6)$$

#### ***4 Теоретическая энергоёмкость черпания взорванных горных пород.***

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

в сыпучих и вязко-сыпучих породах копание осуществляется при блокированной схеме;

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

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

Энергоёмкость черпания при выемке и погрузке взорванной горной массы в первую очередь зависит от:

гранулометрического состава горной массы после взрыва;

коэффициента разрыхления горной массы;

плотности и прочностных свойств породы целика.

Гранулометрический состав взорванной горной массы определяется методом фотопланиметрии или расчетом с установлением выхода каждой фракции, размеров среднего куска, выхода негабарита.

***5 Влияние степени разрыхления массива на энергоёмкость экскавации.*** Характерным для всех разновидностей взорванных пород является значительное уменьшение энергоёмкости черпания с увеличением коэффициента разрыхления горной массы. Коэффициент разрыхления  $K_p$  определяется фотопланиметрическим или расчетным методом с учетом изменения его по объему развала взорванной горной массы. Приблизительно коэффициент разрыхления взорванных полускальных и скальных пород определяется через диаметр среднего куска  $d_{cp}$  (м):

$$K_p = 1 + d_{cp}. \quad (7)$$

Функция  $\eta_p$ , учитывающая влияние коэффициента разрыхления массива на энергоёмкость черпания, рассчитывается по выражению

$$\eta_p = \exp [-(K_p - 1) / 0,92]. \quad (8)$$

***6 Влияние гранулометрического состава на энергоёмкость черпания горных пород.*** Функция  $\eta_d$ , учитывающая влияние гранулометрического

состава взорванных скальных пород или трещиноватых скальных пород на энергоемкость черпания через диаметр среднего куска  $d_{cp}$ , м, рассчитывается по выражению

$$\eta_d = 0,4 + d_{cp} / 0,34. \quad (9)$$

**7 Влияние объема ковша и режима копания на энергоемкость черпания горной массы.** При расчете скорости и производительности копания для конкретного типа экскаватора, кроме свойств массива, необходимо учесть влияние на энергоемкость копания объема ковша и режима копания.

Функция  $\eta_E$ , учитывающая влияние на энергоемкость копания объема ковша экскаватора  $E$ , м<sup>3</sup>, определяется по выражению

$$\eta_E = 1,23 - 0,14\sqrt[3]{E}. \quad (10)$$

Функция  $\eta_h$ , учитывающая влияние глубины копания ( $h$ , м) на энергоемкость копания, рассчитывается по выражению

$$\eta_h = 0,92 + 0,03 / h. \quad (11)$$

**8 Техническая удельная энергоемкость разрушения массива ковшом экскаватора.** Расчетная техническая удельная энергоемкость копания, для различных технических и технологических условий определяется по одному из следующих выражений:

для грунтов

$$e_{FГ} = e_{Г} \cdot \eta_{\Theta} \cdot \eta_h; \quad (12)$$

для полускального и скального трещиноватого массива

$$e_{Fс} = e_{с} \cdot \eta_E \cdot \eta_h \cdot \eta_d; \quad (13)$$

для взорванной горной массы

$$e_{Fв} = e_{с} \cdot \eta_d \cdot \eta_p \cdot \eta_E \cdot \eta_h, \quad (14)$$

где  $e_{Г}$  – удельная энергоемкость копания грунтового массива (2), МДж/м<sup>3</sup>;  $e_{с}$  – удельная энергоемкость копания трещиноватого скального массива (6), МДж/м<sup>3</sup>;  $\eta_d, \eta_p, \eta_E, \eta_h$  – функции, учитывающие влияние на энергоемкость копания размера среднего куска, коэффициента разрыхления массива, объема ковша, толщины стружки.

**9 Математическая модель процесса копания.** При математическом моделировании процесса копания горного массива ковшом экскаватора типа ЭКГ использован принцип дуальности движения массы в пространстве [1], что позволило представить математическую модель процесса в виде совокупности дифференциальных уравнений:

Гамильтона–Якоби

$$\frac{\partial D_k}{\partial t} = -(T + U) + R; \quad (15)$$

Фоккера–Планка–Колмогорова (ФПК)

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} = \frac{D_k}{2m} \nabla^2 \omega + \frac{\nabla D_k}{m} \nabla \omega + \frac{U}{D_k}, \quad (16)$$

где  $D_k$  – полное действие, которое тратится при наполнении ковша за один цикл копания;  $T$  – кинетическая энергия рукояти, ковша и массы грунта в ковше;  $U$  – потенциальная энергия рукояти, ковша и массы грунта в ковше;  $R$  – диссипативная функция, учитывающая потери энергии при отделении грунта от массива и погрузке его в ковш;  $\omega(l, t)$  – нестационарная плотность вероятности как функция длины стружки (пути копания) и времени.

Если в первом приближении принять плотность вероятности  $\omega(l, t)$  в виде  $\delta$ -функции Дирака (детерминированный процесс), то уравнения процесса копания для экскаватора типа ЭКГ можно записать в виде одного уравнения Гамильтона-Якоби

$$\frac{\partial D_k}{\partial t} + \frac{(\Delta_F + \Delta_T + \Delta_U) \Pi_k}{D_{xx}} D_k = 0, \quad (17)$$

где  $D_k$  – полное механическое действие копания, подведенное к системе, Дж·с;

$\Delta_F = \int_U^{t_k} e_F dt$  – удельное действие, затраченное на разрушение и погрузку грунта в ковш, Дж·с/м<sup>3</sup>;  $e_F$  – удельная энергоемкость копания, Дж/м<sup>3</sup> (12)...(14);

$\Delta_T = \int_U^{t_k} \frac{m_0 V_k^2}{2EK_9} dt + \int_U^{t_k} \rho \frac{V_k^2}{2} dt$  – удельное действие для кинетической энергии

ковша с горной породой, Дж·с/м<sup>3</sup>;  $m_0$  – масса ковша, кг;  $K_9 = \frac{K_H}{K_p}$  – коэффициент

экскавации;  $K_H$  – коэффициент наполнения ковша;  $V_k$  – скорость копания, м/с;

$\rho$  – плотность грунта, кг/м<sup>3</sup>;  $\Delta_U = \int_0^{t_k} \frac{m_0 g h_k}{EK_9} dt + \int_0^{t_k} \rho \frac{g h_k}{2} dt$  – удельное действие

для потенциальной энергии ковша с грунтом в гравитационном поле, Дж·с/м<sup>3</sup>;

$g$  – ускорение в гравитационном поле Земли;  $h_k$  – высота центра масс ковша по

отношению к поверхности стояния экскаватора, м;  $D_{xx} = \int_U^{t_k} \int_0^{t_k} N_{xx} dt dt$  – действие

для энергии потерь на холостом ходу, Дж·с;  $N_{xx}$  – мощность потерь на холостом

ходу, Вт;  $\Pi_k = a v V_k$  – производительность копания, м<sup>3</sup>/с.

Решение уравнения (17) можно записать в виде

$$D_k = D_{xx} \exp \left[ \frac{(\Delta_F + \Delta_T + \Delta_U) \int \Pi_k dt_k}{D_{xx}} \right]. \quad (18)$$

Это же выражение для технологической удельной энергоемкости копания  $e_k$ , Дж/м<sup>3</sup>, можно записать

$$e_k = \frac{N_{xx}}{\Pi_k} \exp \left[ \frac{(e_F + e_T + l_U) \Pi_k}{N_{xx}} \right]. \quad (19)$$

**10 Скорость и производительность копания экскаватора.** Скорость копания экскаватора определяем из выражения (18):

$$D_{xx} \ln \frac{D_k}{D_{xx}} = (\Delta_F + \Delta_T + \Delta_U) \int_0^{D_k} \Pi_k dt. \quad (20)$$

Для стационарного процесса копания после некоторых упрощений выражение (20) можно записать в виде

$$\left( m_0 + \rho \frac{EK_{\text{э}}}{2} \right) \frac{V_k^2}{2} + e_F EK_{\text{э}} + \left( m_0 + \rho \frac{EK_{\text{э}}}{2} \right) gh_k - (E_k - E_{xx}) = 0. \quad (21)$$

Из этого баланса энергии средняя скорость копания  $V_k$ , м/с, находится по выражению

$$V_k = \sqrt{\frac{E_k - [E_{xx} + e_F EK_{\text{э}} + mgh_k]}{m}}, \quad (22)$$

где  $E_k = \int_0^{t_k} N_k(t) dt$  – затрачиваемая на процесс копания внешняя энергия, Дж;

$E_{xx}$  – потери энергии на холостом ходу, Дж;  $m = m_0 + \rho \frac{EK_{\text{э}}}{2}$  – усредненная за период копания масса ковша с грунтом, кг.

Тогда средняя за период производительность копания  $\Pi_k$ , м<sup>3</sup>/с, определяется через скорость копания с учетом толщины стружки  $a$ , м, и ширины ковша  $b$ , м:

$$\Pi_k = ab \cdot V_k. \quad (23)$$

### Выводы

Предлагаемая методика расчета производительности и энергоемкости копания экскаватора типа мехлопаты, 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 (табл. 1);

теоретическую удельную энергоемкость разрушения массива горной породы в соответствии с ее категорией (2), (5), (6);

техническую удельную энергоємкость 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 (12), (13), (14); технологическую удельную энергоємкость копания горных пород (19); скорость копания (22) и производительность копания (23) экскаватора.

1. *Крючков А. И.* Наукові принципи і математичні моделі процесів гірничого виробництва // Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». Серія «Гірництво»: Зб. наук. праць. – Київ: НТУУ «КПІ». – 2000. – Вип. 2. – С. 11–17.