

INTERNATIONAL CONFERENCE: DYNAMICS OF MINING MACHINES
DYNAMACH '89

Е.В. ГАЙСЛЕР

Е.А. МОЧАЛОВ

С.В. ШИШАЕВ

Институт горного дела

Сибирское отделение

Академия наук СССР

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА
ЭКСКАВАТОРА С КОВШОМ АКТИВНОГО ДЕЙСТВИЯ

Резюме. Представляемая работа является результатом исследования рабочего процесса экскаватора, оснащенного ковшом активного действия, использование которого позволяет осуществлять экскавацию горных пород повышенной крепости без предварительного рыхления.

Математическая модель рабочего процесса описывает движение ковша в трех основных режимах: резание массива ненарушенной структуры; удар и передвижение ковша на величину внедрения ударного зуба; резание в "зоне с нарушенными связями". Ослабление породы после ударного воздействия учитывается в модели путем изменения сцепления породы. В процессе движения силы со стороны подъемного и напорного механизмов считаются известными, силы сопротивления определяются свойствами породы, формой зубьев и положением ковша в забое. В докладе проводится сравнение экспериментальных и расчетных данных, полученных с помощью математической модели.

Настоящая работа является составной частью широкомасштабной программы по изучению рабочих процессов горных машин с активными исполнительными органами и посвящена созданию математической модели разработки массива карьерным экскаватором с ковшом, для привода активных зубьев которого используются ударные блоки, размещенные в передней стенке.

Ковш работает следующим образом. При встрече с участком породы, для разрушения которого требуется сила, превышающая сумму сил трения инструмента о боксы и усилия включения автомата пуска, включаются ударные блоки. В результате их действия, зубья ковша внедряются в породу на величину X ослабляя при этом зону, расположенную непосредственно перед ними, образуя так называемую "зону с нарушенными связями" (1). Для разрушения последней требуются значительно меньшие усилия, чем для разрушения массива ненарушенной структуры.

Таким образом, применение ковша активного действия позволяет осуществлять экскавацию горных пород повышенной крепости без предварительного рыхления.

К числу основных параметров, определяющих движение ковша при экскавации следует отнести физико-механические свойства горной породы, показатели изменения этих свойств при ударном воздействии, рабочие характеристики приводов исполнительных механизмов и параметры рабочего оборудования. В процессе разработки породы имеют место два вида разрушения - резанием и ударом. Как известно, силы сопротивления внедрению представляют собой нормальные силы и силы трения, действующие на передние, задние и боковые грани зубьев. Величины сил трения определяются нормальными силами и коэффициентами трения, зависящими от материала и состояния поверхностей трения, геометрической формы зубьев, режима разрушения. Геометрическая сумма сил, действующих по всем граням зуба, представляет собой силу сопротивления внедрению. Проекция ее на ось ударного блока - P_1 , на направление перпендикулярное оси - P_2 . Сумма сил, действующих в направлении, перпендикулярном плоскости движения ковша, равна нулю, так как в основном осуществляется блокированное разрушение.

Для построения математической модели, описывающей движение ковша, уместно сделать следующие допущения:

- центр масс породы в ковше неподвижен относительно него;
- отделение стружки идет непрерывно;
- нагрузка на зубьях ковша одинакова;
- внедрение зубьев при ударе происходит мгновенно;
- сопротивление наполнению ковша не учитывается;
- момент трения относительно оси вращения рукоятки не учитывается.

Сделанные допущения позволяют рассматривать движения ковша как движение плоского механизма под действием внешних сил, к которым относятся усилия, развиваемые приводами механизмов напора и подъема, силы тяжести, силы сопротивления со стороны забоя.

Положение ковша в каждый момент времени определяется координатами $\Upsilon(t)$ - расстояние ОС и $\alpha(t)$ - угол между стрелой и рукоятью (рис. 1).

В этом случае кинетическая энергия такого механизма имеет вид

$$T = (m_1 + m_2) \frac{\dot{\Upsilon}^2}{2} + I \frac{\dot{\alpha}^2}{2}, \quad (1)$$

где

m_1 - масса породы в ковше,

m_2 - масса рукоятки и порожнего ковша,

I - момент инерции ковша с породой и рукоятки относительно ее оси вращения.

$$I = m_1 (\tau^2 + |CB|^2) + I_1 + m_2 (\tau - \tau_1)^2 + |GA|^2, \quad (2)$$

где

I_1 - момент инерции порожнего ковша и рукоятки относительно центра масс,

$\tau - \tau_1$ - координата центра масс порожнего ковша и рукоятки.

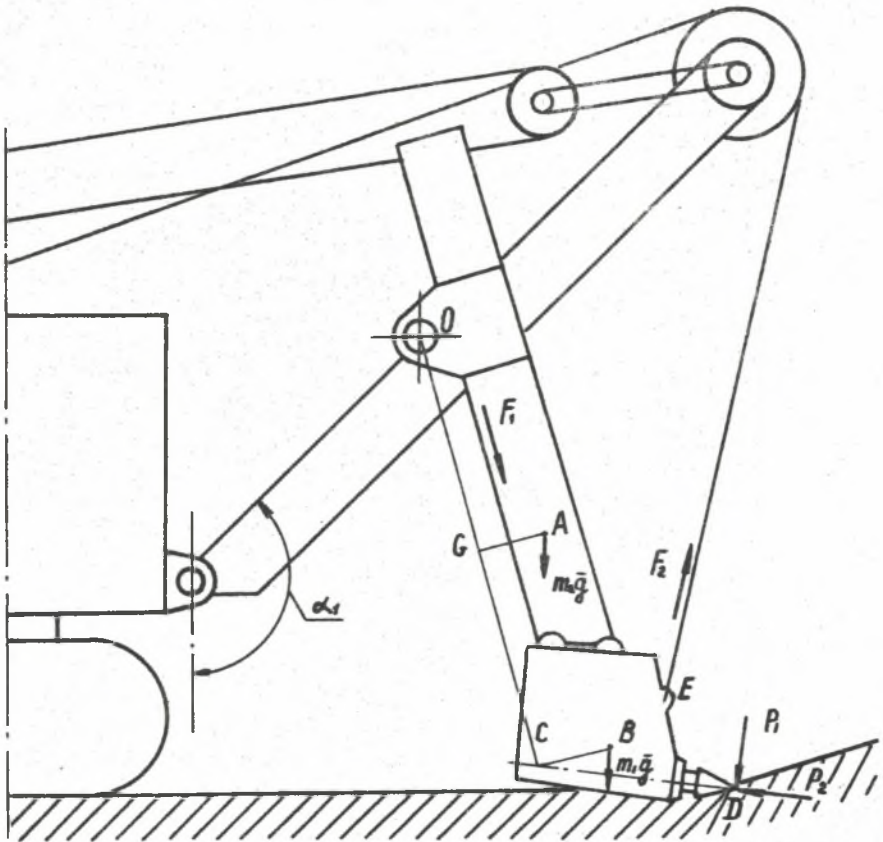


Рис. 1. Расчетная схема экскаватора с ковшом активного действия

Масса породы в ковше - m_1 зависит от пути, пройденного передней кромкой ковша и первоначальной формы забоя. Пусть $\tau_K(\alpha)$ - кривая, описывающая траекторию движения кромки ковша, $\tau_T(\alpha)$ - кривая, описывающая первоначальную форму забоя, тогда

$$m_1 = \rho v \int_{\tau_{K0}}^{\alpha} \int_{\tau_K}^{\tau} (\tau_T - \tau_K) d\tau d\alpha, \tag{3}$$

- где
- ρ - плотность породы,
 - v - ширина ковша,
 - τ_{K0} - координаты начального положения кромки ковша.

Скорость изменения массы породы определяется выражением

$$\dot{m}_1 = \frac{F_{1B}}{2} (\tau_T^2 - \tau_K^2) \dot{\alpha}. \quad (4)$$

Уравнения движения Лагранжа для исследуемого механизма имеет следующий вид

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\tau}} \right) - \frac{\partial T}{\partial \tau} = Q_1 \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\alpha}} \right) - \frac{\partial T}{\partial \alpha} = Q_2, \end{cases} \quad (5)$$

где

Q_1, Q_2 - обобщенные силы, действующие на перемещениях $\delta\tau$ и $\delta\alpha$ соответственно.

$$\begin{aligned} Q_1 &= -P_1 \cos(\pi - \alpha) - P_2 \cos(\widehat{OCD} - \frac{\pi}{2}) + F_1 - F_2 \cos\beta + (m_1 + m_2)g \cos(\alpha_1 - \alpha) \\ Q_2 &= \tau P_1 \sin(\pi - \widehat{OCD}) - \left(\tau + \frac{(CD)}{\cos(\pi - \widehat{OCD})} \right) P_2 \sin(\widehat{OCD} - \frac{\pi}{2}) - \\ &- F_2 \sin\beta (\tau + |CE| \frac{\sin(\widehat{OCE} - \beta)}{\sin\beta}) + (m_1 g \sin(\alpha_1 - \alpha) \tau + \\ &+ m_2 g (\sin(\alpha_1 - \alpha) (\tau - \tau_1) + (m_1 |CB| + m_2 |GA|) g \cos(\alpha_1 - \alpha), \end{aligned} \quad (6)$$

где

$\beta = \beta(\tau, \alpha)$ - угол между направлениями действия сил F_1 и F_2 ,

F_1, F_2 - силы, создаваемые приводами напорного и подъемного механизмов соответственно.

Характеристики приводов напорного и подъемного механизмов экскаватора устанавливают взаимосвязь между моментом сил на валах двигателей и скоростями их вращения, так что

$$\begin{aligned} F_1 &= f_1(\dot{\tau}) \\ F_2 &= f_2(\dot{\tau}, \dot{\alpha}). \end{aligned} \quad (7)$$

Вид функций $f_1(\dot{\tau})$ и $f_2(\dot{\tau}, \dot{\alpha})$ зависит от характеристик двигателей и передаточных чисел механизмов напора и подъема.

В выражения для Q_1, Q_2 входят силы P_1 и P_2 - составляющие сил сопротивления. Их можно определить, используя логико-математические модели Н.Г. Домбровского, А.Н. Зеленина, Ю.А. Ветрова, К.А. Артемьева, В.И. Баловнева или Д.И. Федорова [2].

Так, например, по модели, предложенной В.И. Баловневым, получаем:

$$P_1 = (1 + \operatorname{ctg}\alpha_2 \operatorname{tg}\delta_1) A_1 B_1 h \left(\frac{1}{2} \varphi h + C \operatorname{tg}\delta_2 \left(1 - \frac{1}{A_1} \right) \right) \cos \left(\alpha_2 - \frac{\varphi}{2} \right),$$

при $\alpha_2 > \frac{1}{2} \arcsin \left(\frac{\sin\delta_1}{\sin\delta_2} \right) - \frac{\delta_1}{2}$

$$A_1 = \frac{\cos\delta_1}{1 - \sin\delta_2} \left(\cos\delta_1 + \sqrt{\sin^2\delta_1 - \sin^2\delta_2} \right) \operatorname{tg}\delta_1 + \exp(2\alpha_2 - \pi + \delta_1 \arcsin \left(\frac{\sin\delta_1}{\sin\delta_2} \right))$$

при $\alpha_2 \leq \frac{1}{2} \arcsin \left(\frac{\sin\delta_1}{\sin\delta_2} \right) - \frac{\delta_1}{2}$

$$A_1 = \frac{1 - \sin\delta_2 \cos(2\alpha_2)}{1 - \sin\delta_2},$$

где:

- α_2 - угол резания,
- δ_1 - угол внешнего трения пород,
- δ_2 - угол внутреннего трения пород,
- B_1 - суммарная ширина лезвий зубьев,
- C - сцепление пород в массиве,
- h - толщина разрабатываемого слоя,
- φ - угол заострения инструмента

$$P_2 = (1 + \operatorname{ctg}\alpha_2 \operatorname{tg}\delta_1) A_1 B_1 h \left(\frac{1}{2} \varphi h + C \operatorname{tg}\delta_1 \left(1 - \frac{1}{A_1} \right) \right) \quad (9)$$

Следует отметить, что в выражениях (8), (9) угол резания и толщина разрабатываемого слоя неявно зависят от времени

$$\alpha_2 = \frac{\varphi}{2} + \arcsin \left(\left(1 + \frac{1}{\tau} \frac{\dot{\tau}}{\alpha} \right)^2 - \frac{1}{4} \right) + \arcsin \frac{\tau \sin(\widehat{OCD})}{\sqrt{\tau^2 + |CD|^2 - 2\tau|CD|\cos(\widehat{OCD})}}$$

$$h = \tau_T(\alpha) - \tau_K(\alpha).$$

После вычисления соответствующих производных от кинетической энергии и подстановки их в уравнения Лагранжа, они примут следующую форму.

$$\begin{cases} (m_1 + m_2) \ddot{\tau} + \dot{m}_1 \dot{\tau} - (m_1 \tau + m_2 (\tau - \tau_1)) \dot{\alpha}^2 = Q_1 \\ I \ddot{\alpha} + (\dot{m}_1 (\tau^2 + |CB|^2) + 2m_1 \tau \dot{\tau} + 2m_2 (\tau - \tau_1) \dot{\tau}) \dot{\alpha} = Q_2, \end{cases} \quad (10)$$

где Q_1, Q_2 определяются выражением (6).

Таким образом, движение рассматриваемого механизма описывается уравнениями (10). Начальные условия для этих уравнений

$$\begin{aligned} m_1(0) &= 0 \\ \dot{\alpha}(0) &= 0 \\ \dot{\tau}(0) &= 0 \\ \alpha(0) &= \alpha_0 \\ \tau(0) &= \tau_0 \end{aligned} \quad (11)$$

В процессе разработки можно выделить три основных режима: 1 - резание массива незарушенной структуры; 2 - удар и передвижение корпуса ковша на величину внедрения ударного зуба; 3 - резание в "зоне с нарушенными связями".

Ударения (2) ... (10) с начальными условиями (11) представляют собой математическую модель, описывающую рабочий процесс экскаватора в режиме резания.

Рассмотрим теперь движение ковша в режиме 2. Условие перехода с режима 1 на режим 2 в момент времени t_1 имеет вид:

$$P_1(t_1) > P_2(t_1) + P_3, \quad (12)$$

где:

μ - коэффициент трения инструмента в буксе ковша,

P_3 - усилие включения автомата пуска.

Удар наносится в момент времени t_2

$$t_2 = t_1 + T_1 + T_2,$$

где:

T_1 - время срабатывания автомата,

T_2 - время ударного цикла.

При ударе зубья внедряются в породу на величину X , которая зависит от свойств породы, геометрии зуба, энергии удара. Величина X может определяться экспериментально или на основании известных работ [3, 4, 5].

После нанесения удара движение ковша описывается теми же уравнениями (2)...(10), но с условием $F_1=0$, $P_2=0$, до тех пор, пока передняя кромка ковша не пройдет расстояние X .

Таким образом, условие перехода на режим 3 в момент времени t_3 имеет вид

$$\tau_K^2(t_2) + \tau_K^2(t_3) - 2\tau_K(t_2)\tau_K(t_3) \cos(\alpha(t_2) - \alpha(t_3)) \geq X^2. \quad (13)$$

После выполнения условия (13) начинается резание в режиме 3. При этом считается, что основным показателем изменения свойств горной породы после нанесения удара является снижение сцепления C . После удара его величина сни-

жается до некоторого значения C_0 , а затем возрастает, например, по линейному закону до первоначальной величины. Следует отметить, что C является функцией перемещения инструмента в пределах "зоны с нарушенными связями". Размер этой зоны и значение сцепления могут определяться по результатам экспериментов или на основании известных работ [3, 4, 5]. Движение ковша в "зоне с нарушенными связями" описывается уравнениями (2)...(10), но с дополнительными условиями, налагаемыми на C - сцепление породы. По мере увеличения C возрастают P_1 и P_2 , и дальнейшее движение ковша происходит в режиме 1 или 2 в зависимости от того, выполняется ли условие (12).

Итак, для всех указанных выше режимов движения ковша остаются справедливыми уравнения (2)...(10) с соответствующими условиями, налагаемыми на P_1 , P_2 , C . Переход с режима на режим происходит в зависимости от выполнении условий (11), (12).

Математическая модель в виде уравнений (4), (6), (10), описывающая рабочий процесс экскаватора с ковшом активного действия представляет собой систему нелинейных дифференциальных уравнений, для решения которой был использован модифицированный алгоритм Мерсона с автоматическим выбором шага и контролем точности.

Построенная модель была реализована в виде комплекса программ для ЭВМ в диалоговом режиме так, что в процессе решения предусмотрена возможность корректирования траектории движения ковша путем выбора нагрузочных характеристик приводов механизмов подъема и напора, т.е. выбора соответствующих функций $f_1(\dot{t})$, $f_2(\dot{t}, \dot{\alpha})$, что соответствует реальному управлению экскаватором.

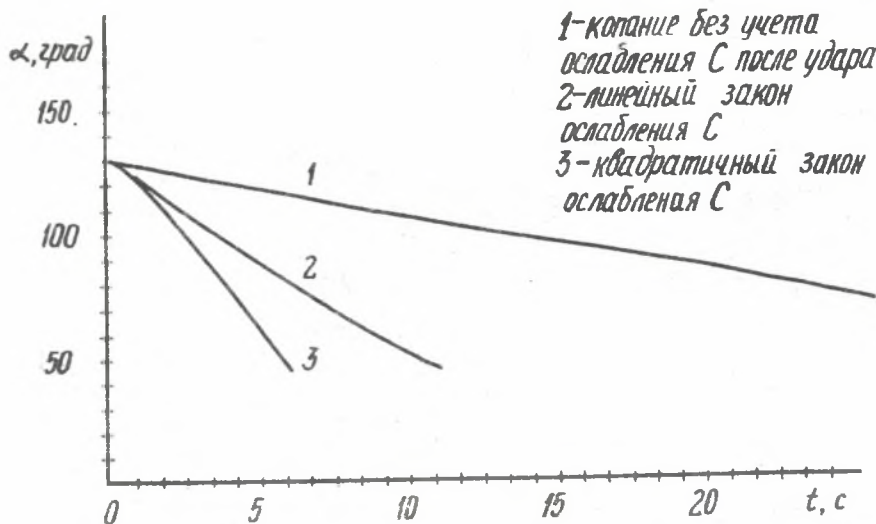


Рис. 2. Зависимость угла поворота рукоятки от времени

Для проверки модели был выполнен расчет процесса копания породы, свойства которой и условия производства работ были аналогичны имевшим место в ходе экспериментов. Некоторые результаты представлены на рис. 2, 3, 4, где штриховыми линиями показаны расчетные значения, сплошными – экспериментальные.

Зависимости на рис. 2 получены для различных законов ослабления C в пределах "зоны с нарушенными связями". При этом наилучшая сходимость результатов наблюдается при линейном законе ослабления C . Для этого случая были проведены расчеты силовых параметров процесса.

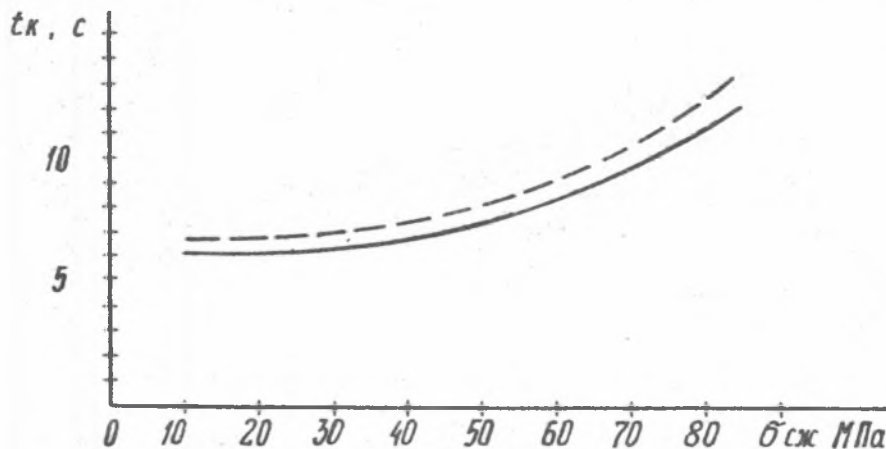


Рис. 3. Зависимость времени копания от прочности породы

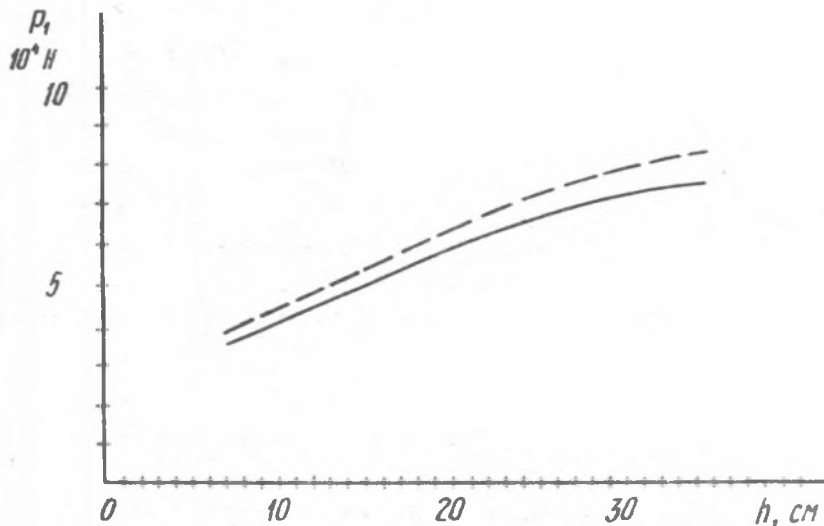


Рис. 4. Зависимость сопротивления копанию от толщины разрушаемого слоя

Сравнение экспериментальных и расчетных данных позволяет сделать вывод об адекватности модели.

Построенная математическая модель позволяет решать задачи исследования параметров рабочего процесса в конкретных условиях экскавации и проектирования подобных машин при заданных технико-экономических показателях разработки массива, свойства которого известны.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Федулов А.И., Лабутина В.Н., Ударное разрушение угла. - Новосибирск: Наука, Сиб. отделение, 1973 - 123 с.
- [2] Баловнев В.И. Моделирование процессов взаимодействия со средой рабочих органов дорожно-строительных машин. - М.: Высшая школа, 1981 - 335 с.
- [3] Софронов С.Т., Егорова О.Н., Теоретическое определение размеров зоны ударного разрушения. - В кн.: Методы решения задач математической ки. Якутск, 1980, с. 40-45.
- [4] Беляков Ю.И., Совершенствование технологии выемочно-погрузочных работ на карьерах. - М.: Недра, 1977 - 295 с.
- [5] Алимов О.Д., Манжосов В.К., Еремьянц В.Э. Удар. Распространение волн деформаций в ударных системах. - М.: Наука, 1985, 357 с.

Recenzent: Doc. dr inż. Julian Zieliński

MODEL MATEMATYCZNY PROCESU ROBOCZEGO KOPARKI Z AKTYWNYM CZERPAKIEM

S t r e s z c z e n i e

Przedstawiana praca - to wynik badań procesu roboczego koparki wyposażonej w czerpak aktywny, którego wykorzystanie pozwala na urzeczywistnienie kopania skał o zwiększonej trwałości bez ich wstępnego spulchniania.

Model matematyczny procesu roboczego opisuje ruch czerpaka w trzech podstawowych warunkach: rozcinanie masywu z nieruszoną strukturą; uderzenie i przesunięcie czerpaka na wielkość wdrożeniową ząbca uderzeniowego; rozcinanie w "strefie ze związkami nieruszonymi". Osłabienie skały po działaniu udarowym w modelu bierze się pod uwagę przez zmianę zaczepiania skały. W procesie ruchu, siły od strony mechanizmów podnoszenia i ciśnienia uważa się za znane, siły oporu określa się własnościami skały, formą ząbców i umiejscowieniem czerpaka w przodku. W referacie podano porównanie danych eksperymentalnych i obliczeniowych, otrzymanych za pomocą modelu matematycznego.

A MATHEMATICAL MODEL OF THE PERFORMANCE OF AN
ACTIVE-BUCKET EXCAVATOR

S u m m a r y

The presented article is a result of a research into the performance of an excavator provided with an active bucket, allowing rock working with improved durability and no preliminary fluffing.

The mathematical model of the performance describes the bucket movement in three basic cases: working on the whole with undisturbed structure, bucket impact and shift by the stroke of the impact cutter, working in the "undisturbed relation zone". Rock strength decreasing after an impact is assumed in the model as a rock shaining. The forces appearing in the moving process and arising from lifting and pressure assemblies are considered known, the resistance is determined from the rock properties, cutter shape and the bucket position at the face. The paper presents the comparison of the experimental data with the results obtained from the mathematical method.