

## АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМОВ РАБОТЫ КАНАТНЫХ ПИЛ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ОТДЕЛЕНИЯ МОНОЛИТОВ ПРИРОДНОГО КАМНЯ ОТ МАССИВА

Першин Г.Д., Уляков М.С.

Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова, Россия

**Аннотация.** Приведены зависимости основных показателей процесса резания (производительность, расход энергии и алмазного инструмента) от режима работы канатной пилы при различной высоте добычного уступа. Разработана методика выбора рационального режима управления канатной пилой, учитывающая установленные зависимости производительности отделения монолита от массива и эксплуатационные затраты на его отделение в зависимости от высоты уступа. Для возможности выбора рационального режима управления канатной пилой предложен комплексный технико-экономический показатель ( $c_w$ ), характеризуемый затратами, отнесенными к интенсивности отделения объемов камня от массива.

**Ключевые слова:** канатная пила, производительность, расход инструмента, удельная работа резания, себестоимость.

### Введение

Добычные горные машины с гибким режущим инструментом к настоящему времени на каменных карьерах всего мира получили доминирующее положение. Это связано с возможностью выпиливать из массива породы монолиты больших размеров (свыше 500 м<sup>3</sup>), необходимость в которых обусловлена повышением выхода товарных блоков на трещиноватых месторождениях. Применение на данных машинах канатно-алмазного инструмента позволило вести добычные работы и на высокопрочных месторождениях природного камня (породы типа гранит). Разработка и применение на карьерах канатно-алмазных пил (такое название утвердилось у горняков) взамен ранее применяемых канатно-абразивных пил, где в качестве абразивной пульпы использовался кварцевый песок с водой, позволило повысить производительность резания в десять и более раз на породах средней прочности и расширить диапазон прочности добываемого камня до уровня гранитов, долеритов и т. д.

К началу двадцатого века канатно-абразивные пилы безвозвратно ушли в прошлое, и поэтому нет необходимости современные горные машины с гибким режущим рабочим органом называть как канатно-алмазные пилы, выделяя алмазный инструмент по отношению к абразивному, который уже не применяется в настоящий период времени.

Отделение больших по объему монолитов камня предполагает применение высокоуступной технологии отработки месторождения, когда все линейные параметры монолита обосновываются по условию максимального выхода товарных блоков в зависимости от природной трещиноватости массива [1, 2]. Независимо от прочно-

сти камня теоретическими исследованиями и практикой обоснована двухстадийная схема добычи товарных блоков, когда на первой, самой трудоемкой, стадии отделяется монолит обоснованных размеров с помощью канатных пил (КП). На второй стадии монолит разделяется на товарные блоки различными способами и реализующими их техническими средствами в зависимости от прочности камня. Для пород типа мрамор применяют баровые камнерезные машины, либо пассировочные КП для окварцованных месторождений. На породах типа гранит используется шпуровой способ с применением клиньев (механических, гидравлических), а также невзрывчатых разрушающих составов (НРС).

Цель данной работы заключается в исследовании влияния режимов работы КП на основные технико-экономические показатели процесса отделения монолитов камня от породного массива.

### Основная часть

На технико-экономические показатели отделения монолита от массива влияют его линейные размеры ( $H, L, B$ ), режимы работы КП и прочность камня. Экономическая оценка работы КП производится с учетом производительности резания, удельного расхода электроэнергии и алмазного инструмента. Удельные эксплуатационные затраты (руб./м<sup>2</sup>) на отделение монолита от массива с помощью КП при этом определяются по зависимости

$$C_s = \frac{C_0}{K_{uo} \cdot \Pi} + b \cdot A \cdot C_3 + b \cdot R \cdot \gamma_a \cdot C_u, \quad (1)$$

где  $C_0, C_3, C_u$  – стоимости соответственно работы канатной пилы (руб./ч), электроэнергии (руб./кВт·ч), алмазного инструмента (руб./карат);

$K_{\text{ис}}=0,75$  – расчетный коэффициент использования КП во времени;  $P$  – техническая производительность КП, м<sup>2</sup>/с;  $b$  – ширина пропила (диаметр алмазорежущей втулки гибкого инструмента), м;  $A$  – удельная работа резания, Дж/м<sup>3</sup>;  $R$  – удельный расход алмазного инструмента, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>;  $\gamma_a$  – содержание алмазов в единице объема алмазосодержащего слоя инструмента, карат/м<sup>3</sup>.

Первое слагаемое уравнения представляет затраты на амортизационные отчисления камнерезного оборудования с учетом затрат на обслуживание и ремонт и заработную плату оператору КП  $C_{AO+ЗП}$ ; второе слагаемое – это затраты на электроэнергию, потребляемую двигателем в процессе резания  $C_{ЭЭ}$ , а третье – затраты, связанные с расходом алмазного инструмента  $C_{АИ}$ .

Применяются две схемы управления работой КП. В первой из схем через задание на пульте управления силы тока определенной величины выдерживается постоянная мощность главного привода ( $N=const$ ), но изменяется скорость подачи тележки машины ( $V_n=var$ ). Существующая обратная связь отслеживает изменение мощности энергии основного двигателя и сводит это изменение к нулю за счет увеличения или уменьшения скорости вращения двигателя механизма подачи. С изменением скорости подачи прямо пропорционально изменяется и силовой режим резания, т. е. величина контактного давления инструмента на породу ( $\sigma_n=var$ ). Во второй схеме – тележке КП путем использования реостата в электрической схеме привода подачи задается постоянная скорость перемещения ( $V_n=const$ ). При этом на пульте управления амперметр показывает силу тока на главном приводе машины. Так как в режиме постоянной скорости подачи обеспечивается неизменным контактное давление инструмента на породу ( $\sigma_n=const$ ), то величина силы тока будет изменяться прямо пропорционально изменению длины контакта инструмента с породой, что вызовет аналогичное изменение мощности энергии главного привода КП.

Как видим, применяемые схемы управления работой КП влияют только на силовой режим резания. По первой схеме силовой режим переменный во времени, во второй схеме – постоянный. Силовой режим определяет и производительность резания, и мощность главного привода камнерезной машины, влияющие на расход дорогостоящего алмазного инструмента и удельное энергопотребление. Среди технико-экономических показателей любой камнерезной машины определяющим является производительность (так как остальные показатели во многом производны от нее). Применительно к существующим схемам управления работой КП рассмотрим методики оценки производительности, энергопотребления и расхода алмазного инструмента.

В случае применения схемы управления с постоянной скоростью подачи средняя производительность КП рассчитывается согласно работе [3]:

$$P_V^{cp} = K_m \cdot P_V^{max}, \quad (2)$$

где  $K_m < 1$  – коэффициент влияния геометрии плоскости отделения монолита на среднюю производительность резания от ее максимального значения.

Максимальная производительность определяется выражением [3]

$$P_V^{max} = \frac{N}{b \cdot 820} \cdot \left( \frac{2 \cdot N}{\mu_{pac} \cdot k_n \cdot b \cdot (\pi + \varphi_0) \cdot h_{np} \cdot V_p} \right)^{0,5}, \quad (3)$$

где  $h_{np}$  – высота пропила, м;  $\varphi_0$  – дополнительный угол охвата, рад;  $\mu_{pac}$  и  $k_n$  – коэффициенты распиловки и прерывистости режущей поверхности;  $b$  – диаметр режущей втулки, м;  $V_p$  – скорость распиловки (скорость движения гибкого режущего органа), м/с.

Для продольного пропила ( $k_\phi = L/H > 1$ ),  $h_{np} = H_y$ ,  $h_{np}$  значение коэффициента  $K_m^{np}$  рассчитывается по формуле

$$K_m^{np} = \frac{k_\phi}{\left( k_\phi + 0,75 - 0,643 \cdot (D_{шк} / H_y) \right)}, \quad (4)$$

где  $D_{шк}$  – диаметр ведущего шкива, м;  $H_y$  – высота уступа, м.

Для поперечного пропила, отделяющего монолит камня от массива, выполняется условие  $k_\phi = B/H \leq 1$ . В этом случае максимальная высота пропила не равна высоте уступа и находится из уравнения

$$h_{np} = \frac{H_y \cdot k_\phi \cdot \left( 2 - k_\phi - \frac{D_{шк}}{2 \cdot H_y} \right)}{\left( 1 - \frac{D_{шк}}{2 \cdot H_y} \right)}, \quad (5)$$

что в итоге определяет расчетную величину коэффициента  $K_m^n$  для поперечного пропила:

$$K_m^n = \frac{\left( 2 - \frac{D_{шк}}{H_y} \right) \cdot \left( 4 - 2 \cdot k_\phi - \frac{D_{шк}}{H_y} \right)}{\left( k_\phi + 0,75 - 0,643 \cdot \frac{D_{шк}}{H_y} \right)}. \quad (6)$$

Зависимость производительности КП, соответствующей схеме управления ею в режиме по-

стоянной мощности резания, когда  $k_\phi = B/H \leq 1$ , определяется по выражению [3]

$$P_N = \frac{N}{820 \cdot b} \cdot \left( \frac{2 \cdot N}{\mu_{рас} \cdot k_n \cdot b \cdot V_p} \right)^{0,5} \cdot \left[ \left( \frac{1}{\pi \cdot D_{иск}} \right)^{0,5} - \left( \frac{1}{(\pi + \varphi_\delta) \cdot h_{np}} \right)^{0,5} \right] \quad (7)$$

При отделении монолита по продольной плоскости ( $k_\phi = L/H > 1$ ,  $h_{np} = H_y$ ) необходимо учитывать стационарность процесса пиления по отношению к длине контакта инструмента с породой. В этом случае производительность в режиме постоянной мощности находится как средневзвешенная величина

$$P_N^{cp} = \frac{(P_N \cdot t_{нест} + P_V^{max} \cdot t_{cm})}{(t_{нест} + t_{cm})}, \quad (8)$$

где  $t_{нест} = (k_\phi \cdot H_y^2 - 0,5 \cdot (k_\phi - 1) \cdot H_y^2) / P_N$  – время нестационарного пиления плоскости отделения, ч;  $t_{cm} = (0,5 \cdot (k_\phi - 1) \cdot H_y^2) / P_V^{max}$  – время стационарного пиления плоскости отделения, ч.

Отношение производительностей при двух режимах для  $k_\phi \leq 1$  запишется в виде

$$\frac{P_N}{P_V} = \frac{1}{K_m^n} \cdot \left[ \left( \frac{(\pi + \varphi_\delta) \cdot h_{np}}{\pi \cdot D_{иск}} \right)^{0,5} - 1 \right], \quad (9)$$

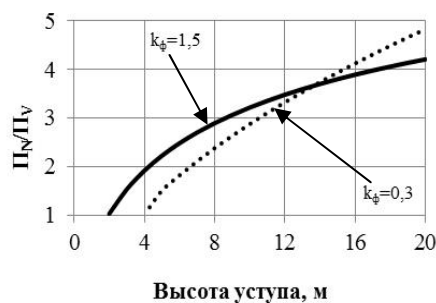
а для  $k_\phi > 1$

$$\frac{P_N^{cp}}{P_V^{cp}} = \frac{(2 \cdot k_\phi \cdot P_N)}{K_m^{np} \cdot ((k_\phi + 1) \cdot P_V^{max} + (k_\phi - 1) \cdot P_N)}. \quad (10)$$

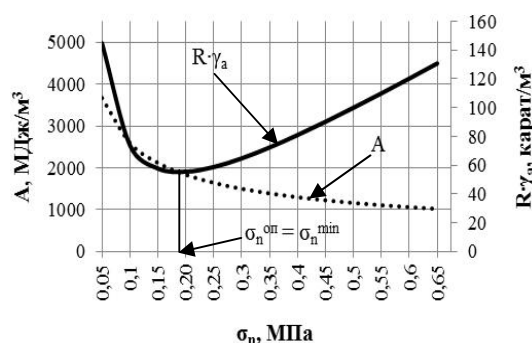
На **рис. 1** представлено отношение производительностей резания КП (9), (10), управляемой по рассмотренным выше силовым режимам.

При этом, начиная с высоты уступа 2–4 м, производительность резания в режиме  $N=const$  по отношению к режиму  $V_{II}=const$  возрастает по степенной зависимости в соответствии с формой плоскости отделения.

Для реализации алмазосберегающего режима распиловки необходимо, чтобы  $\sigma_n^{min} \rightarrow \sigma_n^{on}$  (т. е. отвечало условию минимального удельного расхода алмазного инструмента), где  $\sigma_n^{min}$  – величина контактного нормального напряжения [3], когда в процессе резания выдерживается постоянная скорость подачи (**рис. 2**).



**Рис. 1. Зависимость отношения производительностей резания при различных режимах работы КП от высоты уступа**



**Рис. 2. Зависимости удельного расхода R алмазного инструмента и удельной работы резания A от нормального контактного давления  $\sigma_n$  для пород с  $\sigma_{сж}=100-120$  МПа**

Реализуемое в процессе резания энергопотребление  $A$  для расчета удельных затрат по формуле (1) определяется для режима работы КП с постоянной скоростью подачи следующим образом [3]:

$$A_V = \frac{K}{\sqrt{\sigma_n^{min}}}. \quad (11)$$

Для режима постоянной мощности резания удельное энергопотребление в случае  $k_\phi \leq 1$  находится как средняя интегральная величина по следующей зависимости:

$$A_N = \frac{(2 \cdot K \cdot (\sqrt{\sigma_n^{max}} - \sqrt{\sigma_n^{min}}))}{(\sigma_n^{max} - \sigma_n^{min})}, \quad (12)$$

где  $\sigma_n^{max}$  – максимальное значение нормального напряжения, соответствующее минимальной длине контакта инструмента с породой, Па [3].

При отделении монолита по продольной плоскости ( $k_\phi > 1$ ) удельная работа резания в режиме постоянной мощности находится как средневзвешенная величина:

$$A_N^{cp} = \frac{(A_N \cdot t_{нест} + A_V \cdot t_{cm})}{(t_{нест} + t_{cm})}. \quad (13)$$

Отношение удельных работ резания при двух режимах для поперечной плоскости отделения запишется в следующем виде:

$$\frac{A_N}{A_V} = \frac{\left(2 \cdot \sqrt{\sigma_n^{min}} \cdot \left(\sqrt{\sigma_n^{max}} - \sqrt{\sigma_n^{min}}\right)\right)}{\left(\sigma_n^{max} - \sigma_n^{min}\right)}, \quad (14)$$

а для продольной плоскости отделения

$$\frac{A_N^{cp}}{A_V} = \frac{\left(\sqrt{\sigma_n^{min}} \cdot \left(A_N \cdot t_{нест} + A_V \cdot t_{cm}\right)\right)}{\left(K \cdot \left(t_{нест} + t_{cm}\right)\right)}. \quad (15)$$

На рис. 3 в графическом виде показаны зависимости (14) и (15). Расчеты в данном случае выполнены при следующих данных:  $N=25,47$  кВт,  $\mu_{рас}=0,25$ ,  $k_n=0,16$ ,  $b=0,01$  м,  $D_{ук}=0,8$  м,  $V_p=30$  м/с.

Средняя удельная работа резания (в режиме  $N=const$ ) по отношению к удельной работе резания, соответствующей

$\sigma_n^{min} = \sigma_n^{он}$  (в режиме  $V_{II}=const$ ), возрастает в соответствии с формой плоскости отделения (см. рис. 3).

Удельный расход алмазного инструмента  $R$ , как и удельная работа резания  $A$ , может быть получен на основе стендовых испытаний. Для дальнейших расчетов были приняты экспериментальные данные канд. техн. наук К.Г. Лусиняна по резанию алмазным инструментом природного камня различной прочности [4]. В результате обработки экспериментальных точек получена следующая аппроксимирующая зависимость  $R$  от  $\sigma_n$ :

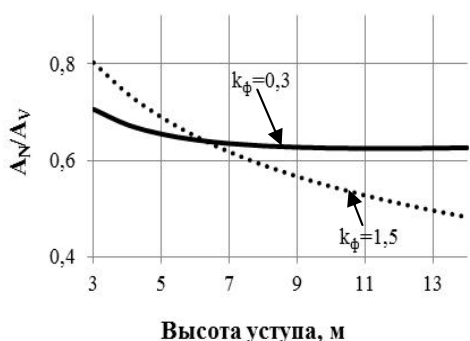


Рис. 3. Зависимость отношения среднего (в режиме  $N=const$ ) и соответствующего  $\sigma_n^{min} = \sigma_n^{он}$  (в режиме  $V_{II}=const$ ) значений удельной работы резания от высоты уступа

$$R = r_0 + \frac{r_1}{\sigma_n} + r_2 \cdot \sigma_n, \quad (16)$$

решение которой при условии  $\partial R / \partial \sigma_n = 0$  дает оптимальное контактное давление  $\sigma_n^{он} = \sqrt{r_1 / r_2}$ . Его подстановка в (16) и определяет расход алмазного инструмента в режиме  $V_{II}=const$ :

$$R_V^{min} = r_0 + \frac{r_1}{\sqrt{r_1 / r_2}} + r_2 \cdot \sqrt{r_1 / r_2}. \quad (17)$$

Численные значения аппроксимирующих коэффициентов  $r_0 = -1,46 \cdot 10^{-5}$ ,  $r_1 = 0,376 \cdot 10^{-5}$  МПа,  $r_2 = 10,5 \cdot 10^{-5}$  1/МПа были получены при резании природного камня с  $\sigma_{сж} = 120-140$  МПа. Для режима  $N=const$  удельный расход может быть получен как средняя интегральная величина:

$$R_N = \frac{r_0 \cdot \left(\sigma_n^{max} - \sigma_n^{min}\right) + r_1 \cdot \ln \frac{\sigma_n^{max}}{\sigma_n^{min}} + 0,5 \cdot r_2 \cdot \left(\left(\sigma_n^{max}\right)^2 - \left(\sigma_n^{min}\right)^2\right)}{\sigma_n^{max} - \sigma_n^{min}}. \quad (18)$$

Тогда их отношение для поперечной плоскости отделения запишется в следующем виде:

$$\frac{R_N}{R_V^{min}} = \frac{r_0 \cdot \left(\sigma_n^{max} - \sigma_n^{min}\right) + r_1 \cdot \ln \frac{\sigma_n^{max}}{\sigma_n^{min}} + 0,5 \cdot r_2 \cdot \left(\left(\sigma_n^{max}\right)^2 - \left(\sigma_n^{min}\right)^2\right)}{\left(\sigma_n^{max} - \sigma_n^{min}\right) \cdot \left(r_0 + \frac{r_1}{\sqrt{r_1 / r_2}} + r_2 \cdot \sqrt{r_1 / r_2}\right)}. \quad (19)$$

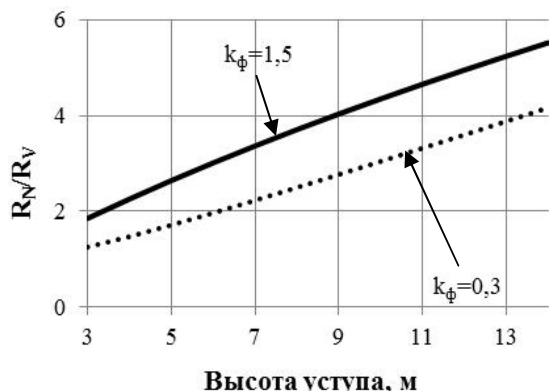
При отделении монолита по продольной плоскости удельный расход инструмента в режиме постоянной мощности находится как средневзвешенная величина:

$$R_N^{cp} = \frac{\left(R_N \cdot t_{нест} + R_V^{min} \cdot t_{cm}\right)}{\left(t_{нест} + t_{cm}\right)}. \quad (20)$$

Тогда отношение удельных расходов инструмента при двух режимах для продольной плоскости отделения запишется в виде

$$\frac{R_N^{cp}}{R_V^{min}} = \frac{R_N \cdot t_{нест} + R_V^{min} \cdot t_{cm}}{\left(t_{нест} + t_{cm}\right) \cdot \left(r_0 + \frac{r_1}{\sqrt{r_1 / r_2}} + r_2 \cdot \sqrt{r_1 / r_2}\right)}. \quad (21)$$

На рис. 4 в графическом виде показаны зависимости (20) и (21) при различном значении коэффициента  $k_{\phi}$ .



**Рис. 4. Зависимость отношения среднего (в режиме  $N=const$ ) и минимального (в режиме  $V_{п}=const$ ) значений удельного расхода алмазного инструмента от высоты уступа**

Среднее значение удельного расхода алмазного инструмента (в режиме  $N=const$ ) по отношению к минимальному (в режиме  $V_{п}=const$ ) возрастает в соответствии с формой плоскости отделения (см. рис. 4).

Экономические показатели при различных параметрах и режимах распиловки алмазноканатным инструментом гранодиорита Нижне-Санарского месторождения (линейные размеры монолита:  $H_m=5,6$  м,  $L_m=8,4$  м,  $B_m=1,7$  м) приведены в табл. 1, 2.

**Таблица 1**

**Расчетные параметры и технико-экономические показатели работы КП в режиме  $V_{п}=const$**

Режим	$V_{п}=const, \sigma_n=const, \sigma_n^{min}=0,2$ МПа, $A=1833,58$ МДж/м <sup>3</sup>		
Вид плоскости отделения ( $K_{\phi}$ )	Горизонтальная (0,2)	Поперечная (0,3)	Продольная (1,5)
$N^{max}$ , кВт	8,24	12,18	25,47
$R^{min} \cdot \gamma_a$ , карат/м <sup>3</sup>	55,31		
$K_m$	0,63	0,60	0,70
$P^{max}$ , м <sup>2</sup> /ч	1,62	2,39	5,00
$P^{cp}$ , м <sup>2</sup> /ч	1,01	1,42	3,48
$N_{уд}$ , кВт·ч/м <sup>2</sup>	18,34		
$S_{AO+зп}$ , руб./м <sup>2</sup>	391,69	279,69	114,36
$S_{эз}$ , руб./м <sup>2</sup>	15,80		
$S_{AI}$ , руб./м <sup>2</sup>	158,07		
$S_s$ , руб./м <sup>2</sup>	565,56	453,56	288,23
$S$ , м <sup>2</sup>	14,11	9,41	47,04
$t_{пиления}$ , ч	14,1	6,7	13,5
$\sum t_{пиления}$ , ч	34,4		
$C$ , тыс. руб.	7,98	4,27	13,56
$\sum C$ (по монолиту), тыс. руб.	25,81		

**Таблица 2**

**Расчетные параметры и технико-экономические показатели работы КП в режиме  $N=const$**

Режим	$N=const, \sigma_n=var$		
	Горизонтальная (0,2)	Поперечная (0,3)	Продольная (1,5)
$N$ , кВт	8,24	12,18	25,47
$\sigma_n^{max}$ , МПа	0,57	0,81	1,69
$A^{cp}$ , МДж/м <sup>3</sup>	1364,34	1219,42	1185,90
$R \cdot \gamma_a$ , карат/м <sup>3</sup>	78,21	103,20	158,61
$P$ , м <sup>2</sup> /ч	1,10	2,41	8,28
$N_{уд}$ , кВт·ч/м <sup>2</sup>	13,64	12,19	11,86
$S_{AO+зп}$ , руб./м <sup>2</sup>	362,96	165,00	47,99
$S_{эз}$ , руб./м <sup>2</sup>	11,75	10,51	10,22
$S_{AI}$ , руб./м <sup>2</sup>	223,54	294,94	453,30
$S_s$ , руб./м <sup>2</sup>	598,26	470,45	511,51
$t_{пиления}$ , ч	13,0	4,0	5,7
$\sum t_{пиления}$ , ч	22,7		
$C$ , тыс. руб.	8,44	4,43	24,06
$\sum C$ (по монолиту), тыс. руб.	36,93		

Время, затраченное на резание плоскостей, для условий Юго-Восточного участка Нижне-Санарского месторождения гранодиоритов в случае работы КП в режиме  $N=const$  в 1,5 раза меньше, чем в режиме  $V_{п}=const$ . Результаты оценки доли пиления во всем процессе подготовки камня к выемке в зависимости от режима работы КП приведены в табл. 3.

**Таблица 3**

**Доля времени выполнения пропилов КП в процессе подготовки к выемке гранодиорита Нижне-Санарского месторождения при различных режимах резания**

Вид работ	Время выполнения, ч	
	$V_{п}=const, \sigma_n=const$	$N=const, \sigma_n=var$
Бурение горизонтальной продольной скважины (8,4 м)	3,5	
Поиск отметок для стыковки скважин	3,0	
Бурение горизонтальной поперечной скважины (1,7 м)	2,0	
Горизонтальный пропил КП (14,28 м <sup>2</sup> )	14,14	13,0
Поиск отметок для стыковки скважин	3,0	
Бурение вертикальной скважины (5,6 м)	2,5	
Вертикальный поперечный пропил КП (9,52 м <sup>2</sup> )	6,70	4,0
Вертикальный продольный пропил КП (47,04 м <sup>2</sup> )	13,52	5,68
Отсыпка подушки	0,5	
Опрокидывание монолита на рабочую площадку	3,0	
Разделка опрокинутого монолита и пассировка блоков шпуровым способом с применением механических клиньев	4,0	
Время подготовки к выемке блоков природного камня, ч	55,9	44,1
Время пиления, ч (в % от общего)	34,4 (61,5%)	22,7 (51,5%)

Таким образом, время, затраченное на выполнение пропилов КП, в процессе подготовки к выемке камня занимает 51,5 и 61,5% для режимов  $N=const$  и  $V_{\Pi}=const$  соответственно.

По формуле (1) были рассчитаны удельные эксплуатационные затраты на резание плоскостей отделения монолита от массива. Это позволило представить в графическом виде отношения удельных эксплуатационных затрат при различных режимах работы КП от высоты уступа (рис. 5).

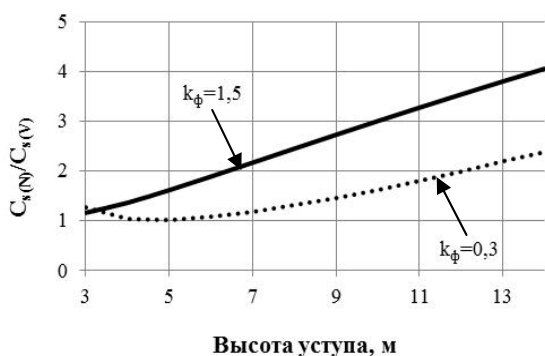


Рис. 5. Зависимость отношения удельных эксплуатационных затрат на резание плоскостей при различных режимах работы КП от высоты уступа

Удельные эксплуатационные затраты на резание плоскостей в режиме  $N=const$  по отношению к режиму  $V_{\Pi}=const$  возрастают, начиная с высоты уступа 4,5 м (см. рис. 5, 6) в соответствии с формой плоскости отделения. Так, при высоте уступа  $H_y^{on}=5,6$  м отношение значений себестоимости  $C_{s(N)}/C_{s(V)}$  составляет 1,0–1,8 в зависимости от величины коэффициента  $k_{\phi}$ .

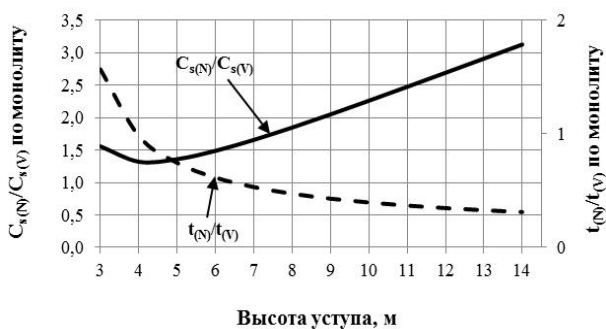


Рис. 6. Зависимость отношения удельных эксплуатационных затрат на резание плоскостей и времени, затраченного на пиление (по монолиту) при различных режимах работы КП от высоты уступа

Основным результатом проведенных исследований и полученных зависимостей (1), (9), (10), (14), (15), (19), (21) влияния силового режима на технико-экономические показатели является вывод о неоднозначном вкладе в эксплуатаци-

онные затраты производительности, энергопотребления и расхода алмазного инструмента при резании. Так как силовой режим в пределах заданной мощности главного привода канатной пилы связан с высотой пропила (уступа), то с практических позиций целесообразнее полученные технико-экономические показатели представлять в виде функциональных зависимостей от высоты уступа для различных режимов работы КП.

Анализ таких итоговых показателей, как производительность отделения монолита от массива (рис. 7, а) и эксплуатационные затраты на отделение (рис. 7, б) в зависимости от высоты уступа для различных режимов работы КП не позволяет выделить преимущества одного режима работы КП от другого, так как повышение производительности отделения монолита сопровождается повышением эксплуатационных затрат на его отделение при работе в режиме постоянной мощности резания и, наоборот, когда снижению эксплуатационных затрат соответствует понижение производительности, если КП работает в режиме постоянной скорости подачи.

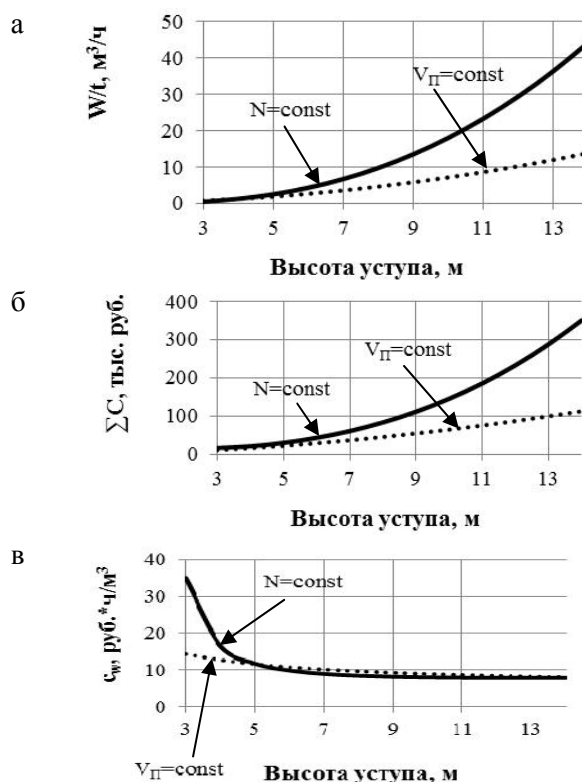


Рис. 7. Зависимость от высоты уступа (при различных режимах работы КП): а – производительности отделения монолита от массива с помощью КП ( $W/t$ ,  $m^3/ч$ ); б – эксплуатационных затрат на отделение монолита от массива ( $\Sigma C$ , тыс. руб.); в – комплексного технико-экономического показателя ( $c_w$ , руб.·ч/ $m^3$ )

В этом случае корректная оценка зависимости режима работы КП от высоты уступа может быть дана на основе комплексного технико-экономического показателя:

$$c_w = \frac{\sum C}{(W/t)}, \quad (22)$$

где  $\sum C$  – эксплуатационные затраты на отделение монолита от массива, тыс. руб.;  $W/t$  – производительность отделения монолита от массива, м<sup>3</sup>/ч.

Тогда выбор режима работы КП в зависимости от высоты уступа осуществляется по минимальной величине предложенного комплексного показателя (рис. 7, в).

Как видно из рис. 7, в, при отделении монолита с высотой добычного уступа менее 4,5 м предпочтение следует отдавать режиму с постоянной скоростью подачи КП на забой. При высоте уступа более 4,5 м, когда показатель  $c_w$  изменяется незначительно от режима работы КП, целесообразен режим работы с постоянной мощностью резания, обеспечивающий более высокую производительность отделения монолита [5–8].

### Выводы

1. Получены зависимости отношения производительностей резания при различных режимах работы КП от высоты уступа. При этом, начиная с высоты уступа 2–4 м, производительность резания в режиме  $N=const$  по отношению к режиму  $V_{II}=const$  возрастает по степенной зависимости в соответствии с формой плоскости отделения.

2. Предложены зависимости показателя удельной работы резания ( $A$ , МДж/м<sup>3</sup>) от высоты уступа при различных схемах управления КП и величине коэффициента  $k_\phi$ . Средняя удельная работа резания (в режиме  $N=const$ ) по отношению к удельной работе резания, соответствующей  $\sigma_n^{\min} = \sigma_n^{\text{оп}}$  (в режиме  $V_{II}=const$ ), возрастает в соответствии с формой плоскости отделения.

3. Установлены зависимости показателя  $R \cdot \gamma_a$  (карат/м<sup>3</sup>) от высоты уступа при различных схемах управления КП и величине коэффициента  $k_\phi$ . Среднее значение удельного расхода алмазного инструмента (в режиме  $N=const$ ) по отношению к минимальному (в режиме  $V_{II}=const$ ) возрастает в соответствии с формой плоскости отделения.

4. Время, затраченное на резание плоскостей, для условий Юго-Восточного участка Нижне-

Санарского месторождения гранодиоритов в случае работы КП в режиме  $N=const$  (22,7 ч) в 1,5 раза меньше, чем в режиме  $V_{II}=const$  (34,4 ч). При этом доля времени, затраченного на выполнение пропилов КП, в процессе подготовки к выемке камня занимает 51,5 и 61,5% для режимов  $N=const$  и  $V_{II}=const$  соответственно.

5. Удельные эксплуатационные затраты на резание плоскостей в режиме  $N=const$  по отношению к режиму  $V_{II}=const$  возрастают в соответствии с формой плоскости отделения. Отношение значений удельных эксплуатационных затрат  $C_{s(N)}/C_{s(V)}$  при высоте уступа  $H_y^{\text{оп}}=5,6$  м составляет 1,0–1,8 в зависимости от величины коэффициента  $k_\phi$ .

6. Производительность отделения монолита от массива с помощью КП, работающей в режиме постоянной мощности резания, при высоте уступа 5–13 м повышается в 1,2–3 раза по отношению к режиму постоянной скорости подачи КП на забой. Одновременно повышаются во столько же раз и эксплуатационные затраты на отделение монолита, что не дает основания по данным показателям выявить преимущества одного режима от другого. Поэтому за критерий оценки принимается комплексный технико-экономический показатель ( $c_w$ ), характеризующийся затратами, отнесенными к интенсивности отделения объемов камня от массива. Выбор рационального режима работы КП от высоты уступа достигается путем минимизации величины этого комплексного показателя.

7. Для отделения монолитов камня от горного массива при высоте добычного уступа менее 4,5 м следует выбирать режим резания с постоянной скоростью подачи КП на забой. При высоте уступа более 4,5 м, когда показатель  $c_w$  изменяется незначительно в зависимости от режима работы КП, целесообразен режим работы с постоянной мощностью резания, обеспечивающий более высокую производительность отделения монолита.

### Список литературы

1. Першин Г.Д., Уляков М.С. Обоснование способов подготовки к выемке блочного природного камня высокой прочности // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2010. №4 (32). С. 14–19.
2. Першин Г.Д., Караулов Н.Г., Уляков М.С. The research of high-strength dimension stone mining technological schemes in Russia and abroad // Сборник научных трудов SWorld. Вып. 2. Т. 11. Одесса: КУПРИЕНКО, 2013. С. 64–73.
3. Першин Г.Д., Пшеничная Е.Г., Уляков М.С. Влияние режима

- управления работой канатной пилы на ее производительность // Добыча, обработка и применение природного камня: сб. науч. тр. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2012. С. 54–63.
4. Акопян Р.В., Лусинян К.Г. Исследование влияния режимов резания на износ алмазных элементов алмазно-канатного режущего инструмента // Изучение природных каменных материалов и силикатного сырья, разработка эффективной техники и технологии производства: сб. науч. тр. Ереван: НИИКС, 1983. С. 40–49.
  5. Features of diamond-wire saws application for rock overburden removal at marble quarry construction / Першин Г.Д., Караулов Н.Г., Уляков М.С., Шаров В.Н. // Сборник научных трудов SWorld. Вып. 3. Т. 14. Одесса: КУПРИЕНКО, 2013. С. 39–42.
  6. Першин Г.Д., Уляков М.С. Анализ влияния режимов работы канатных пил на себестоимость отделения монолитов камня от породного массива // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2014. № 2. С. 125–135.
  7. Бычков Г.В., Кокунин Р.В. Оптимальные способы вскрытия рабочих горизонтов на перспективных и эксплуатирующихся месторождениях природного камня // Добыча, обработка и применение природного камня: сб. науч. тр. Магнитогорск: МГТУ, 2007. С. 83–92.
  8. Бархоткин В.В., Извеков Ю.А., Миникаев С.Р. Обзор аварий на крановом оборудовании металлургических производств // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2013. № 10–1. С. 9–11.

### INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

## ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF CABLE SAW OPERATION MODES ON CUTTING OF NATURAL STONE MONOLITHS FROM A MASSIF

**Pershin Gennadiy Daltonovitch** – D.Sc. (Eng.), Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Russia.

**Ulyakov Maxim Sergeevich** – Ph.D. (Eng.), Assistant Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Russia. E-mail: maxim-atlet@yandex.ru.

**Abstract.** The article gives dependences of main indicators of the cutting process (performance, consumption of power and diamond tools) on the cable saw operation modes at different bench heights. We developed a technique for selecting a reasonable cable saw control mode taking into account the established dependencies on cutting performance and operational costs for cutting monoliths from the massif depending on a bench height. To select such reasonable cable saw control mode, we introduced a comprehensive technical and economic indicator ( $c_w$ ) characterized by costs charged to the intensity of cutting stones from the massif.

**Keywords:** cable saw, performance, tool consumption, specific work of cutting, cost.

#### References

1. Pershin G.D., Ulyakov M.S. Substantiation of the ways to prepare block strong natural stones for excavation. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2010, no. 4 (32), pp. 14–19.
2. Pershin G.D., Karaulov N.G., Ulyakov M.S. The research of high-strength dimension stone mining technological schemes in Russia and abroad. Collection of scientific papers SWorld. Iss. 2. Vol. 11. Odessa: Kuprienko, 2013, pp. 64–73.
3. Pershin G.D., Pshenichnaya E.G., Ulyakov M.S. Influence of a cable saw control mode on its performance. *Dobycha, obrabotka i primeneniye prirodnogo kamnya* [Natural stone mining, processing and application: collection of scientific papers]. Magnitogorsk: Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2012, pp. 54–63.
4. Akopyan R.V., Lusinyan K.G. Study of the influence of cutting modes on wear of diamond elements of diamond rope cutting tools. *Izucheniye prirodnnykh kamennykh materialov i silikatnogo syrya, razrabotka effektivnoy tekhniki i tekhnologii proizvodstva* [The study of natural stone materials and silicate raw materials, development of efficient equipment and production technology: collection of scientific papers]. Yerevan: RISS, 1983, pp. 40–49.
5. Pershin G.D., Karaulov N.G., Ulyakov M.S., Sharov V.N. Features of diamond-wire saws application for rock overburden removal at marble quarry construction. Collection of scientific works SWorld. Iss. 3. Vol. 14. Odessa: Kuprienko, 2013, pp. 39–42.
6. Pershin G.D., Ulyakov M.S. Analysis of the influence of cable saw operation modes on cost of cutting stone monoliths from a rock massif. *Physics and technology problems of resource development*, 2014, no. 2, pp. 125–135.
7. Bychkov G.V., Kokunin R.V. Optimum ways of opening working levels at prospective and operating natural stone deposits. *Dobycha, obrabotka i primeneniye prirodnogo kamnya* [Natural stone mining, processing and application: collection of scientific papers]. Magnitogorsk: Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2007, pp. 83–92.
8. Barkhotkin V.V., Izvekov Yu.A., Minikayev S.R. The review of accidents on crane equipment of metallurgical facilities. *International journal of applied and basic research*, 2013, no. 10–1, pp. 9–11.