

УДК 622.35:621.93.025.7

**АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМОВ РАБОТЫ КАНАТНЫХ ПИЛ
НА СЕБЕСТОИМОСТЬ ОТДЕЛЕНИЯ
МОНОЛИТОВ КАМНЯ ОТ ПОРОДНОГО МАССИВА**

Г. Д. Першин, М. С. Уляков

*Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова,
просп. Ленина, 38, 455000, г. Магнитогорск, Россия*

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 от высоты уступа. Для возможности выбора рационального режима управления канатной пилой предложен комплексный технико-экономический показатель, характеризуемый затратами, отнесенными к интенсивности отделения объемов камня от массива.

Канатная пила, производительность, расход инструмента, удельная работа резания, себестоимость

Добычные горные машины с гибким режущим инструментом к настоящему времени на каменных карьерах всего мира получили доминирующее положение [1–6]. Это связано с возможностью выпиливать из массива породы монолиты больших размеров (свыше 500 м³), необходимость в которых обусловлена повышением выхода товарных блоков на месторождениях с трещиноватыми породными массивами. Применение на данных машинах канатно-алмазного инструмента позволило вести добычные работы на месторождениях высокопрочного природного камня (породы типа гранит). Разработка и применение на карьерах канатно-алмазных пил взамен канатно-абразивных, где в качестве абразивной пульпы использовался кварцевый песок с водой, позволили повысить производительность резания в 10 раз и более на породах средней прочности и расширить диапазон прочности добываемого камня до уровня гранитов, долеритов и т. д.

Отделение больших по объему монолитов камня предполагает применение высокоуступной технологии отработки месторождения, когда все линейные параметры монолита определяются по условию максимального выхода товарных блоков в зависимости от природной трещиноватости массива [2, 5, 6]. Независимо от прочности камня, теоретическими исследованиями и практикой обоснована двухстадийная схема добычи товарных блоков, когда на первой самой трудоемкой стадии отделяется монолит установленных 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 КП для окварцованных месторождений. На породах типа гранит используется шпуровой способ с применением клиньев (механических, гидравлических), а также невзрывчатых разрушающих составов (НРС).

На технико-экономические показатели отделения монолита от массива влияют его линейные размеры (H, L, B), режимы работы КП и прочность камня [7–9]. Экономическая оценка работы КП проводится с учетом производительности резания, удельного расхода электроэнергии и алмазного инструмента. Удельные эксплуатационные затраты (руб/м²) на отделение монолита от массива с помощью КП при этом определяются по зависимости

$$C_s = \frac{C_o}{K_{\text{ио}} P} + bAC_s + bR\gamma_a C_{\text{и}}, \quad (1)$$

где C_o , C_s , $C_{\text{и}}$ — стоимость работы канатной пилы (руб/ч), электроэнергии (руб/(кВт·ч)) и алмазного инструмента (руб/карат) соответственно; $K_{\text{ио}} = 0.75$ — расчетный коэффициент использования КП во времени; P — техническая производительность КП, м²/с; b — ширина пропила (диаметр алмазорежущей втулки гибкого инструмента), м; A — удельная работа резания, Дж/м³; R — удельный расход алмазного инструмента, м³/м³; γ_a — содержание алмазов в единице объема алмазнесущего слоя инструмента, карат/м³.

Первое слагаемое уравнения представляет затраты на амортизационные отчисления камнерезного оборудования с учетом затрат на обслуживание, ремонт и заработную плату оператору КП $C_{\text{ао+зп}}$; второе слагаемое — затраты на электроэнергию, потребляемую двигателем в процессе резания $C_{\text{э}}$, третье — затраты, связанные с расходом алмазного инструмента $C_{\text{и}}$ [7, 8].

Применяются две схемы управления работой КП. В первой через задание на пульте управления определенной силы тока выдерживается постоянная мощность главного привода ($N = \text{const}$), но изменяется скорость подачи тележки машины ($V_{\text{п}} = \text{var}$). 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. контактное давление инструмента на породу ($\sigma_{\text{п}} = \text{var}$). Во второй схеме тележке КП путем использования реостата в электрической схеме привода подачи задается постоянная скорость перемещения ($V_{\text{п}} = \text{const}$). 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 ($\sigma_{\text{п}} = \text{const}$), то сила тока будет изменяться прямо пропорционально длине 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. В первой схеме силовой режим переменный во времени, во второй — постоянный. Силовой режим определяет 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. Применительно к существующим схемам управления работой КП рассмотрим методики оценки производительности, энергопотребления и расхода алмазного инструмента [9–12].

В случае применения схемы управления с постоянной скоростью подачи средняя производительность КП рассчитывается согласно работе [9]:

$$\Pi_V^{\text{cp}} = K_M \Pi_V^{\text{max}},$$

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

Максимальная производительность определяется выражением [9]

$$\Pi_V^{\text{max}} = \frac{N}{820b} \left(\frac{2N}{\mu_{\text{pac}} k_{\text{п}} b (\pi + \varphi_{\text{д}}) h_{\text{пр}} V_{\text{р}}} \right)^{0.5},$$

где $h_{\text{пр}}$ — высота пропила, м; $\varphi_{\text{д}}$ — дополнительный угол охвата, рад; μ_{pac} и $k_{\text{п}}$ — коэффициенты распиловки и прерывистости режущей поверхности; b — диаметр режущей втулки, м; $V_{\text{р}}$ — скорость распиловки (скорость движения гибкого режущего органа), м/с.

Для продольного пропила ($k_{\text{ф}} = L/H > 1$), $h_{\text{пр}} = H_y$, а значение коэффициента $K_M^{\text{пр}}$ рассчитывается по формуле

$$K_M^{\text{пр}} = k_{\text{ф}} / [k_{\text{ф}} + 0.75 - 0.643(D_{\text{шк}} / H_y)],$$

где $D_{\text{шк}}$ — диаметр ведущего шкива, м; H_y — высота уступа, м; $k_{\text{ф}}$ — коэффициент формы плоскостей отделения монолита от массива.

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

$$h_{\text{пр}} = H_y k_{\text{ф}} \left(2 - k_{\text{ф}} - \frac{D_{\text{шк}}}{2H_y} \right) / \left(1 - \frac{D_{\text{шк}}}{2H_y} \right),$$

что в итоге определяет расчетный коэффициент $K_M^{\text{п}}$ для поперечного пропила:

$$K_M^{\text{п}} = \left(2 - \frac{D_{\text{шк}}}{H_y} \right) / \left[k_{\text{ф}} + 0.75 - 0.643 \frac{D_{\text{шк}}}{H_y} \right] \left(4 - 2k_{\text{ф}} - \frac{D_{\text{шк}}}{H_y} \right).$$

Зависимость производительности КП, соответствующей схеме управления ею в режиме постоянной мощности резания, когда $k_{\text{ф}} = B/H \leq 1$, находится по выражению [9]

$$\Pi_N = \frac{N}{820b} \left(\frac{2N}{\mu_{\text{pac}} k_{\text{п}} b V_{\text{р}}} \right)^{0.5} \left[\left(\frac{1}{\pi D_{\text{шк}}} \right)^{0.5} - \left(\frac{1}{(\pi + \varphi_{\text{д}}) h_{\text{пр}}} \right)^{0.5} \right].$$

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

$$\Pi_N^{\text{cp}} = (\Pi_N t_{\text{нест}} + \Pi_V^{\text{max}} t_{\text{ст}}) / (t_{\text{нест}} + t_{\text{ст}}),$$

где $t_{\text{нест}} = (k_{\text{ф}} H_y^2 - 0.5(k_{\text{ф}} - 1) H_y^2) / \Pi_N$ — время нестационарного пиления плоскости отделения, ч; $t_{\text{ст}} = (0.5(k_{\text{ф}} - 1) H_y^2) / \Pi_V^{\text{max}}$ — время стационарного пиления плоскости отделения, ч.

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

$$\frac{\Pi_N}{\Pi_V} = \frac{1}{K_M^{\Pi}} \left[\left(\frac{(\pi + \varphi_d) h_{\text{пр}}}{\pi D_{\text{шк}}} \right)^{0.5} - 1 \right], \quad (2)$$

а для $k_\phi > 1$

$$\frac{\Pi_N^{cp}}{\Pi_V^{cp}} = \frac{2k_\phi \Pi_N}{K_M^{\Pi} [(k_\phi + 1) \Pi_V^{\text{max}} + (k_\phi - 1) \Pi_N]}. \quad (3)$$

На рис. 1 представлено отношение производительностей резания КП (2), (3), управляемой по рассмотренным выше силовым режимам.

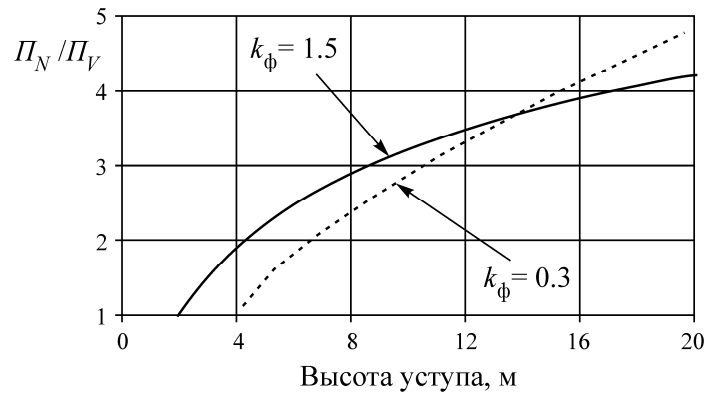


Рис. 1. Зависимость отношения производительностей резания при различных режимах работы КП от высоты уступа

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

Для реализации алмазосберегающего режима распиловки необходимо, чтобы $\sigma_n^{\text{min}} \rightarrow \sigma_n^{\text{оп}}$ (т. е. отвечало условию минимального удельного расхода алмазного инструмента), где σ_n^{min} — величина контактного нормального напряжения [9, 12], когда в процессе резания выдерживается постоянная скорость подачи (рис. 2).

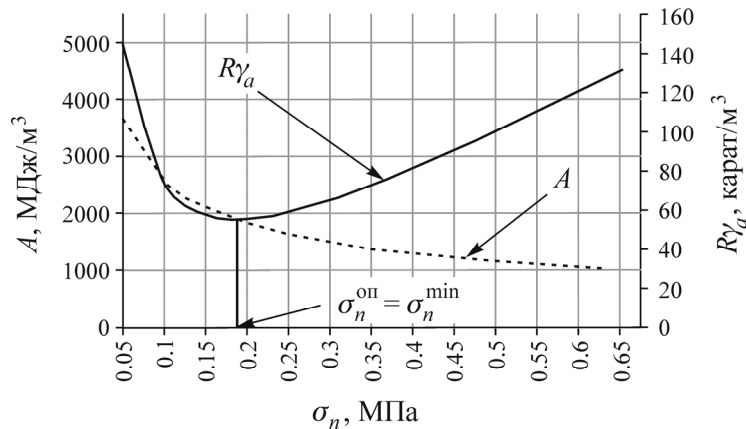


Рис. 2. Зависимость удельного расхода (R) алмазного инструмента и удельной работы резания (A) от нормального контактного давления (σ_n) для пород с $\sigma_{\text{сж}} = 100 - 120$ МПа

Реализуемое в процессе резания энергопотребление (A) для расчета удельных затрат по формуле (1) определяется для режима работы КП с постоянной скоростью подачи следующим образом [9]:

$$A_V = K / \sqrt{\sigma_n^{\min}}.$$

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

$$A_N = [2K(\sqrt{\sigma_n^{\max}} - \sqrt{\sigma_n^{\min}})] / (\sigma_n^{\max} - \sigma_n^{\min}),$$

где σ_n^{\max} — максимальное значение нормального напряжения, соответствующее минимальной длине контакта инструмента с породой, Па [9].

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

$$A_N^{\text{cp}} = (A_N t_{\text{нест}} + A_V t_{\text{ст}}) / (t_{\text{нест}} + t_{\text{ст}}).$$

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

$$\frac{A_N}{A_V} = \frac{2\sqrt{\sigma_n^{\min}}(\sqrt{\sigma_n^{\max}} - \sqrt{\sigma_n^{\min}})}{\sigma_n^{\max} - \sigma_n^{\min}}, \quad (4)$$

а для продольной плоскости отделения

$$\frac{A_N^{\text{cp}}}{A_V} = \frac{\sqrt{\sigma_n^{\min}}(A_N t_{\text{нест}} + A_V t_{\text{ст}})}{K(t_{\text{нест}} + t_{\text{ст}})}. \quad (5)$$

На рис. 3 показаны зависимости (4) и (5). Расчеты в данном случае выполнены при следующих данных: $N = 25.47$ кВт, $\mu_{\text{рас}} = 0.25$, $k_{\text{п}} = 0.16$, $b = 0.01$ м, $D_{\text{шк}} = 0.8$ м, $V_p = 30$ м/с.

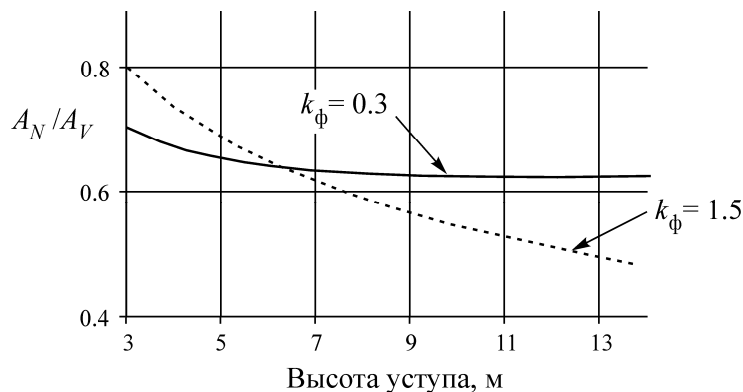


Рис. 3. Зависимость отношения среднего (в режиме $N = \text{const}$) и соответствующего $\sigma_n^{\min} = \sigma_n^{\text{оп}}$ (в режиме $V_p = \text{const}$) значений удельной работы резания от высоты уступа

Средняя удельная работа резания (в режиме $N = \text{const}$) по отношению к удельной работе резания, соответствующей $\sigma_n^{\min} = \sigma_n^{\text{оп}}$ (в режиме $V_p = \text{const}$), возрастает в соответствии с формой плоскости отделения.

Удельный расход алмазного инструмента (R), как и удельная работа резания (A), может быть вычислен на основе стендовых испытаний. Для дальнейших расчетов приняты экспериментальные данные по резанию алмазным инструментом природного камня различной прочности [13]. В результате обработки экспериментальных точек имеем следующую аппроксимирующую зависимость R от σ_n :

$$R = r_0 + r_1 / \sigma_n + r_2 \sigma_n, \tag{6}$$

решение которой при условии $\partial R / \partial \sigma_n = 0$ дает оптимальное контактное давление $\sigma_n^{on} = \sqrt{r_1 / r_2}$. Его подстановка в (6) и определяет расход алмазного инструмента в режиме $V_n = const$:

$$R_V^{min} = r_0 + \frac{r_1}{\sqrt{r_1 / r_2}} + r_2 \sqrt{r_1 / r_2}.$$

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 получены при резании природного камня с $\sigma_{сж} = 120 - 140$ МПа. Для режима $N = const$ удельный расход может быть рассчитан как средняя интегральная величина:

$$R_N = \frac{r_0(\sigma_n^{max} - \sigma_n^{min}) + r_1 \ln(\sigma_n^{max} / \sigma_n^{min}) + 0.5 r_2 [(\sigma_n^{max})^2 - (\sigma_n^{min})^2]}{\sigma_n^{max} - \sigma_n^{min}}.$$

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

$$\frac{R_N}{R_V^{min}} = \frac{r_0(\sigma_n^{max} - \sigma_n^{min}) + r_1 \ln(\sigma_n^{max} / \sigma_n^{min}) + 0.5 r_2 [(\sigma_n^{max})^2 - (\sigma_n^{min})^2]}{(\sigma_n^{max} - \sigma_n^{min})(r_0 + r_1 / \sqrt{r_1 / r_2} + r_2 \sqrt{r_1 / r_2})}. \tag{7}$$

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

$$R_N^{cp} = (R_N t_{нест} + R_V^{min} t_{ст}) / (t_{нест} + t_{ст}). \tag{8}$$

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

$$\frac{R_N^{cp}}{R_V^{min}} = \frac{R_N t_{нест} + R_V^{min} t_{ст}}{(t_{нест} + t_{ст}) \left(r_0 + \frac{r_1}{\sqrt{r_1 / r_2}} + r_2 \sqrt{r_1 / r_2} \right)}. \tag{9}$$

На рис. 4 показаны зависимости (8) и (9) при различном значении коэффициента k_ϕ .

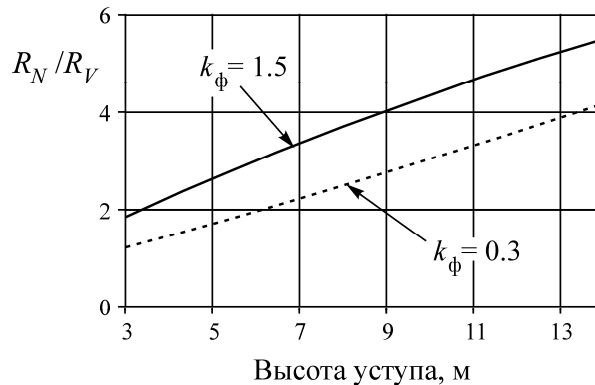


Рис. 4. Зависимость отношения среднего (в режиме $N = const$) и минимального ($V_n = const$) значений удельного расхода алмазного инструмента от высоты уступа

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

Экономические показатели при различных параметрах и режимах распиловки алмазно-канатным инструментом гранодиорита Нижне-Санарского месторождения (линейные размеры монолита: $H_{\text{м}} = 5.6$ м, $L_{\text{м}} = 8.4$ м, $B_{\text{м}} = 1.7$ м) приведены в табл. 1, 2 [14].

ТАБЛИЦА 1. Расчетные параметры и технико-экономические показатели работы КП в режиме $V_{\text{п}} = \text{const}$

Режим	$V_{\text{п}} = \text{const}, \sigma_{\text{п}} = \text{const}, \sigma_{\text{п}}^{\text{min}} = 0.2 \text{ МПа}, A = 1833.58 \text{ МДж/м}^3$		
Вид плоскости отделения (k_{ϕ})	Горизонтальная (0.2)	Поперечная (0.3)	Продольная (1.5)
N^{max} , кВт	8.24	12.18	25.47
$R^{\text{min}} \gamma_{\text{а}}$, карат/м ³	55.31		
$K_{\text{м}}$	0.63	0.60	0.70
$П^{\text{max}}$, м ² /ч	1.62	2.39	5.00
$П^{\text{cp}}$, м ² /ч	1.01	1.42	3.48
$N_{\text{уд}}$, кВт·ч/м ²	18.34		
$C_{\text{ао+зп}}$, руб/м ²	391.69	279.69	114.36
$C_{\text{ээ}}$, руб/м ²	15.80		
$C_{\text{аи}}$, руб/м ²	158.07		
$C_{\text{с}}$, руб/м ²	565.56	453.56	288.23
S , м ²	14.11	9.41	47.04
$t_{\text{пил}}$, ч	14.1	6,7	13.5
$\sum t_{\text{пил}}$, 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 $N = \text{const}$

Режим	$N = \text{const}, \sigma_{\text{п}} = \text{var}$		
Вид плоскости отделения (k_{ϕ})	Горизонтальная (0.2)	Поперечная (0.3)	Продольная (1.5)
N , кВт	8.24	12.18	25.47
$\sigma_{\text{п}}^{\text{max}}$, МПа	0.57	0.81	1.69
A^{cp} , МДж/м ³	1364.34	1219.42	1185.90
$R \gamma_{\text{а}}$, карат/м ³	78.21	103.20	158.61
$П$, м ² /ч	1.10	2.41	8.28
$N_{\text{уд}}$, кВт·ч/м ²	13.64	12.19	11.86
$C_{\text{ао+зп}}$, руб./м ²	362.96	165.00	47.99
$C_{\text{ээ}}$, руб./м ²	11.75	10.51	10.22
$C_{\text{аи}}$, руб./м ²	223.54	294.94	453.30
$C_{\text{с}}$, руб./м ²	598.26	470.45	511.51
$t_{\text{пил}}$, ч	13.0	4.0	5.7
$\sum t_{\text{пил}}$, 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 $N = \text{const}$ в 1.5 раза меньше, чем в режиме $V_{\text{п}} = \text{const}$. Результаты оценки доли пиления во всем процессе подготовки камня к выемке в зависимости от режима работы КП приведены в табл. 3.

ТАБЛИЦА 3. Время выполнения пропилов КП в процессе подготовки к выемке гранодиорита Нижне-Санарского месторождения при различных режимах резания, ч

Вид работы	Время выполнения при режимах резания	
	$V_{\text{п}} = \text{const}, \sigma_{\text{п}} = \text{const}$	$N = \text{const}, \sigma_{\text{п}} = \text{var}$
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 ²)	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 ²)	6.70	4.0
Вертикальный продольный пропил КП (47.04 м ²)	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	55.9	44.1
Время пиления (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 $N = \text{const}$ и $V_{\text{п}} = \text{const}$ соответственно.

По формуле (1) рассчитаны удельные эксплуатационные затраты на резание плоскостей отделения монолита от массива. Это позволило представить в графическом виде изменение отношения удельных эксплуатационных затрат при различных режимах работы КП от высоты уступа (рис. 5а). Удельные эксплуатационные затраты на резание плоскостей в режиме $N = \text{const}$ по отношению к режиму $V_{\text{п}} = \text{const}$ возрастают начиная с высоты уступа 4.5 м (см. рис. 5а, б) в соответствии с формой плоскости отделения. Так, при высоте уступа $H_y^{\text{оп}} = 5.6$ м отношение значений себестоимости $C_{s(N)} / C_{s(V)}$ составляет 1.0–1.8 в зависимости от величины коэффициента k_{ϕ} .

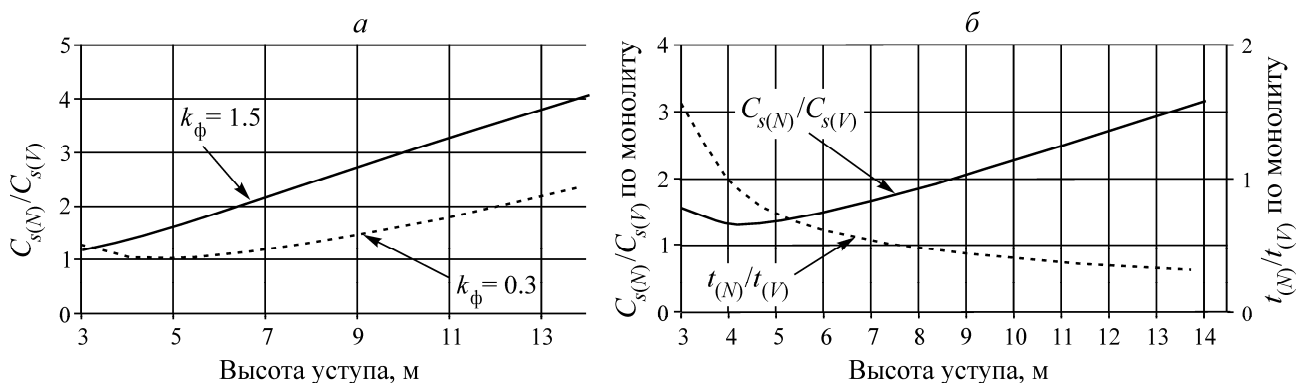


Рис. 5. Зависимость отношения удельных эксплуатационных затрат на резание плоскостей (а) и времени, затраченного на пиление (б), при различных режимах работы КП от высоты уступа

Основным результатом проведенных исследований и полученных зависимостей (1)–(5), (7), (9) влияния силового режима на технико-экономические показатели является вывод о неоднозначном дольном участии в эксплуатационных затратах при резании производительности, энергопотребления и расхода алмазного инструмента. 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. 6а) и эксплуатационные затраты на отделение (рис. 6б) в зависимости от высоты уступа для различных режимов работы КП, не позволяет выделить преимущества одного режима работы КП от другого, поскольку 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.

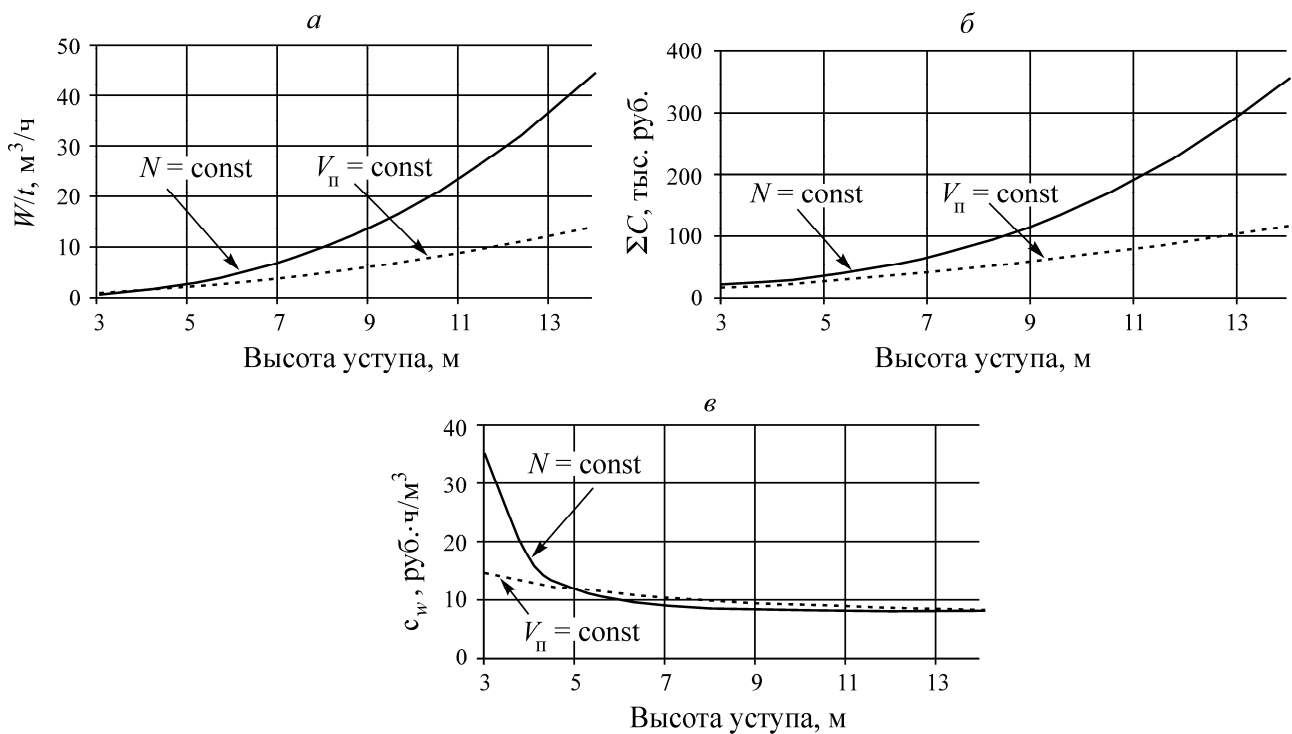


Рис. 6. Зависимость от высоты уступа (при различных режимах работы КП): а — производительности отделения монолита от массива с помощью КП (W/t); б — эксплуатационных затрат на отделение монолита от массива (ΣC); в — комплексного технико-экономического показателя (c_w)

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

$$c_w = \sum C/(W/t),$$

где $\sum C$ — эксплуатационные затраты на отделение монолита от массива, тыс. руб.; W/t — производительность отделения монолита от массива, m^3/h .

Тогда выбор режима работы КП в зависимости от высоты уступа осуществляется по минимальному значению предложенного комплексного показателя (рис. 6в). 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 [6, 9].

ВЫВОДЫ

Получены зависимости отношения производительности резания при различных режимах работы канатной пилы от высоты уступа. Начиная с высоты уступа 2–4 м производительность резания в режиме $N = \text{const}$ по отношению к режиму $V_{\text{п}} = \text{const}$ возрастает по степенной зависимости в соответствии с формой плоскости отделения.

Предложены зависимости показателя удельной работы резания от высоты уступа при различных схемах управления КП и значении коэффициента k_{ϕ} . Средняя удельная работа резания (в режиме $N = \text{const}$) по отношению к удельной работе резания, соответствующей $\sigma_n^{\text{min}} = \sigma_n^{\text{оп}}$ (в режиме $V_{\text{п}} = \text{const}$), возрастает в соответствии с формой плоскости отделения.

Установлены зависимости показателя удельного расхода алмазного инструмента от высоты уступа при различных схемах управления КП и значении коэффициента k_{ϕ} . Среднее значение удельного расхода алмазного инструмента (в режиме $N = \text{const}$) по отношению к минимальному (в режиме $V_{\text{п}} = \text{const}$) возрастает в соответствии с формой плоскости отделения.

Время, затраченное на резание плоскостей в условиях Юго-Восточного участка Нижне-Санарского месторождения гранодиоритов при работе КП в режиме $N = \text{const}$, в 1.5 раза меньше, чем в режиме $V_{\text{п}} = \text{const}$. При этом время, затраченное на выполнение пропилов КП, в процессе подготовки к выемке камня занимает 51.5 и 61.5 % для режимов $N = \text{const}$ и $V_{\text{п}} = \text{const}$ соответственно.

Удельные эксплуатационные затраты на резание плоскостей в режиме $N = \text{const}$ по отношению к режиму $V_{\text{п}} = \text{const}$ возрастают в соответствии с формой плоскости отделения. Отношение значений удельных эксплуатационных затрат при высоте уступа 5.6 м составляет 1.0–1.8 в зависимости от значения коэффициента k_{ϕ} .

Производительность отделения монолита от массива с помощью КП, работающей в режиме постоянной мощности резания при высоте уступа 5–13 м, увеличивается в 1.2–3 раза по отношению к режиму постоянной скорости подачи КП на забой. Одновременно увеличиваются во столько же раз и эксплуатационные затраты на отделение монолита, что не дает основания по данным показателям выявить преимущества рассматриваемых режимов. За критерий оценки принимается комплексный технико-экономический показатель c_w , характеризуемый затратами, отнесенными к интенсивности отделения объемов камня от массива. Выбор рационального режима работы пилы от высоты уступа достигается путем минимизации этого комплексного показателя.

Для отделения монолитов камня от породного 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 комплексный показатель изменяется незначительно в зависимости от режима работы пилы, целесообразен режим работы с постоянной мощностью резания, обеспечивающий более высокую производительность отделения монолита.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **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. / под ред. Г. Д. Першина. — Магнитогорск: Изд-во МГТУ, 2007.
2. **Дубровский А. Б., Уляков М. С.** Выбор оборудования при разработке Нижне-Санарского месторождения гранодиоритов // Горн. журн. — 2011. — № 5.
3. **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. — 2013. — Т. 11. — № 2.
4. **Аглюков Х. И.** Обоснование эффективности технологии добычи блочного гранита. Добыча, обработка и применение природного камня: сб. науч. тр. / под ред. Г. Д. Першина. — Магнитогорск: Изд-во МГТУ, 2003.
5. **Першин Г. Д., Караулов Н. Г., Уляков М. С., Шаров В. Н.** Features of diamond-wire saws application for rock overburden removal at marble quarry construction // Сборник научных трудов SWorld. — 2013. — Т. 14. — № 3.
6. **Аглюков Х. И.** Повышение качества технологии добычи блочного гранита. Экономика, управление, качество: межвуз. сб. науч. тр. — Магнитогорск: Изд-во МГТУ, 2003.
7. **Аглюков Х. И.** Налог на добычу полезных ископаемых. — Магнитогорск: Изд-во МГТУ, 2010.
8. **Аглюков Х. И.** Эффективность производства гранитного щебня // Добыча, обработка и применение природного камня: сб. науч. тр. — Магнитогорск: Изд-во МГТУ, 2009.
9. **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. / под ред. Г. Д. Першина. — Магнитогорск: Изд-во МГТУ, 2012.
10. **Пащенко К. Г., Бахматов Ю. Ф., Фролушкина К. А., Зарицкий Б. Б.** Влияние технологических параметров на обрывность проволоки при бесфильтрном волочении // Материалы 67-й науч.-техн. конф.: сб. докл. — Магнитогорск: Изд-во МГТУ, 2009. — Т. 1.
11. **Пащенко К. Г., Бахматов Ю. Ф., Голубчик Э. М.** Влияние пластического растяжения – изгиба в совмещенном процессе удаления окалина — волочения на свойства проволоки // Сталь. — 2011. — № 3.
12. **Pashchenko K. G., Bakhmatov Y. F., Golubchik E. M.** Influence of plastic tension-flexure on the wire properties in scale removal and drawing, Steel in Translation, 2011, Vol. 41, No. 3.
13. **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.
14. **Першин Г. Д., Уляков М. С.** Обоснование способов подготовки к выемке блочного природного камня высокой прочности // Вестн. МГТУ. — 2010. — № 4 (32).

Поступила в редакцию 23/XII 2013