

ЭКОНОМИКА, ОРГАНИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ В ГОРНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

УДК 622.23.054.72

Г.Д. Першин, В.А. Утешев

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПРИ ОЦЕНКЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ КАНАТНЫХ ПИЛ В КАРЬЕРЕ*

Эффективность высокоуступной канатно-алмазной технологии добычи с применением канатно-алмазных пил доказана в ряде работ [1], а практикой подтверждено повышение выхода товарных блоков мрамора посредством увеличения объемов добываемых монолитов.

Переход на высокоуступную технологию на сегодняшний день – один из основных способов повышения объемов добываемых монолитов, который успешно практикуется на итальянских карьерах. Но это требует установки более мощного двигателя на канатную пилу, поскольку с ростом высоты обрабатываемого уступа возрастает протяженность участка контакта гибкого инструмента с породой. На основании работы [2] мощность распиловки прямо пропорционально зависит от длины контакта при условии, что остальные параметры процесса принимают постоянное значение:

$$N_{pac} = \mu \cdot \sigma_n \cdot b \cdot k_{II} \cdot l_K \cdot V_p, \quad (1)$$

где μ – коэффициент распиловки; σ_n – давление инструмента на породу, Н/м²; b – диаметр режущей втулки, м; k_{II} – коэффициент прерывистости режущей поверхности инструмента (отношение длины режущего контура к длине рабочего алмазного слоя); l_K – длина контакта инструмента с породой, м; V_p – скорость распиловки (скорость движения гибкого режущего органа), м/с.

В процессе отделения монолита вертикальными пропилами продольного и поперечного направления длина линии контакта l_K непостоянна и принимает значение от $l_K \approx 0$ (момент запилки) до, например, $l_K \approx (0,25 \div 0,5)\pi$, м (момент окончания реза при диаметре приводного шкива $D_{ш}=1$ м). На схеме (рис. 1) можно выделить три

стадии протекания продольного пропила при отделении добываемого монолита: 1 – запилывание; 2 – стационарное пиление; 3 – допиливание.

Максимальное значение длины контакта инструмента с породой, которая соответствует окончанию 1 стадии распиловки, будет определяться как

$$l_K^{max} = \frac{\pi \cdot H}{2} + R \cdot \varphi_0, \quad (2)$$

где H – высота отделяемого монолита, м; $R=H/2$ – радиус дополнительного сектора контакта, м; φ_0 – дополнительный угол охвата, рад.

Аналитическими исследованиями [3] определено значение дополнительного угла охвата φ_0 при производстве продольного и поперечного пропилов.

Связь между максимальной мощностью распиловки, как установленной мощностью канатно-алмазной пилы, и соответствующей ей предельно возможной производительности резания примем в энергетической форме по следующему выражению:

$$P_{max} = \frac{N_{max}}{A_{уд} \cdot b}, \quad (3)$$

где $A_{уд}$ – удельная работа распиловки, Дж/м³; N_{max} – максимальная (установленная) мощность канатной пилы, Вт.

При заданной скорости резания, для каждой конкретной породы, $A_{уд}$ зависит от силового режима σ_n и может быть определена на основе экспериментальных исследований в условиях стеновых, а также промышленных испытаний.

В алмазосберегающем режиме распиловки $A_{уд}$ принимает постоянное значение, определяемое только прочностью породы и режущей способностью алмазного инструмента. Для реализации ал-

* Работа выполнена при поддержке гранта правительства Челябинской области.

мазосберегающего режима необходимо в процессе пиления независимо от изменения длины контакта инструмента с породой выдерживать всегда постоянным контактное давление величиной $\sigma_n = \sigma_n^{on}$. Этому условию в достаточной мере будет отвечать режим перемещения канатно-алмазной пилы по направляющим с постоянной скоростью $V_n = const$. Используя экспериментальную зависимость удельного расхода алмазонасного слоя на рабочих элементах от величины контактного давления [4] и методику расчета контактного давления инструмента на породу от времени распиловки в режиме $V_{II} = const$, были получены графические взаимосвязи (рис. 2), откуда следует, что повышение контактного давления на стадии допиливания реза происходит на 20% от установленного максимального значения. Данное изменение контактного давления в соответствии с приведенной на рис. 2 диаграммой $R_{уд} = f(\sigma_n)$ вызывает повышение удельного расхода алмазного инструмента всего лишь на 6% по отношению к минимальной величине. На этом основании можно сделать вывод о незначительном влиянии на удельный расход алмазного инструмента ($R_{уд} \cdot \gamma_\alpha$) силового параметра σ_n , когда режим распиловки осуществляется при условии $V_{II} = const$ ($R_{уд}$, м³/м³ – относительный расход алмазного инструмента; γ_α , карат/м³ – содержание алмазов в единице объема алмазонасного слоя инструмента).

Среднюю производительность канатной пилы, через ее максимальное значение (3), определяем следующим образом:

$$P_{cp} = \frac{H \cdot L}{t_{пил}} K_m \cdot P_{max}, \quad (4)$$

где $t_{пил}$ – время пиления наибольшей по площади продольной (фронтальной) плоскости отделения монолита камня от массива породы; L – длина отделяемого монолита, м; $K_m < 1$ – коэффициент пропорциональности.

Время проходки продольного реза рассчитываем по формуле

$$t_{пил} = \frac{l_{пер}}{V_{II}} = \frac{l_{пер} \cdot H}{P_{max}}, \quad (5)$$

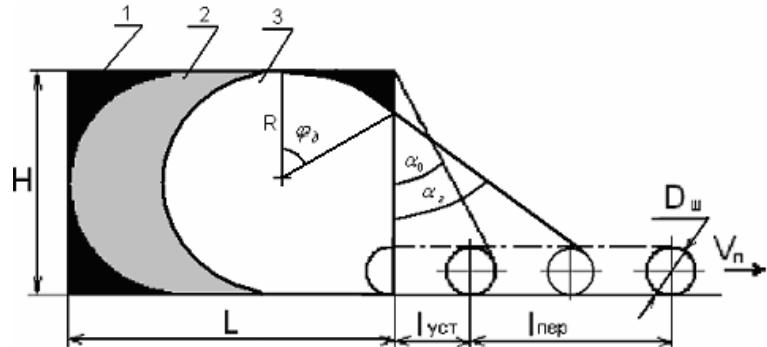


Рис. 1. Расчетная схема к определению геометрических и кинематических параметров отделения монолита гибким инструментом по продольному направлению

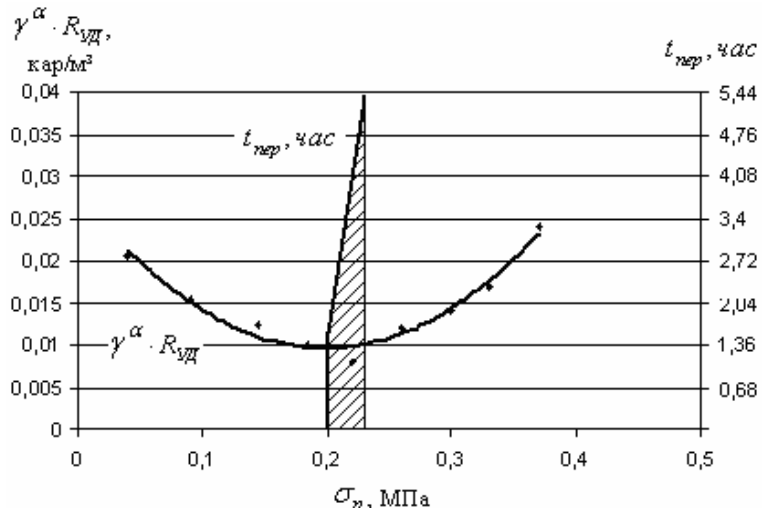


Рис. 2. Изменение контактного давления инструмента на породу и его удельного расхода от времени пиления в режиме $V_{II} = const$ (для продольного пропила с линейными размерами $L \times H = 12 \times 6$ м)

где $l_{пер}$ – окончательный путь перемещения тележки, м.

Путь перемещения тележки канатной пилы к моменту окончания реза по заданной плоскости определяется из особенностей кинематики процесса распиловки гибким инструментом при условии неизменности длины контура в начальный и конечный моменты времени (см. рис. 1):

$$l_{пер} = H \left[k_\phi + 0,5 \cdot \left(1 + \frac{1 - \sin \alpha_0}{\cos \alpha_0} \right) - 0,5 \frac{D}{H} \cdot \left(\frac{\pi}{4} + \frac{1 - \sin \alpha_0}{\cos \alpha_0} \right) \right], \quad (6)$$

где $k_\phi = L/H$ – коэффициент формы продольной плоскости отделения (L – длина контакта, м).

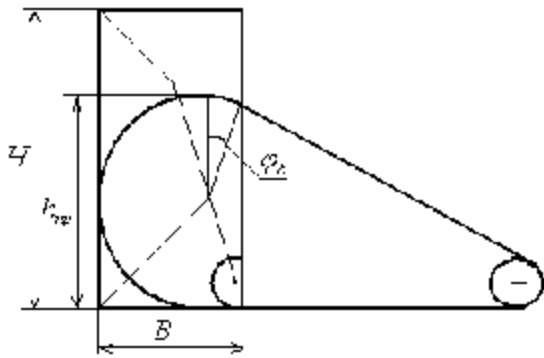


Рис. 3. Схема производства поперечного реза

Как показывает практика, α_0 назначается в пределах $30-35^\circ$, тогда выражение (6) упрощается до вида

$$l_{нр} = H \cdot \left[k_\phi + \frac{3}{4} - \frac{1}{8}(\pi + 2) \frac{D}{H} \right].$$

После чего становится возможным определить среднюю производительность канатной пилы за время пиления фронтальной плоскости заданной площади при условии, когда $k_\phi \geq 1$:

$$P_{ср} \frac{L \cdot \Pi_{max}}{l_{нр}} = K_m \cdot \frac{N_{max}}{A_{уд} \cdot b}, \quad (7)$$

где $K_m = \frac{k_\phi}{\left[k_\phi + \frac{3}{4} - \frac{(\pi + 2)}{8} \cdot \frac{D}{H} \right]}$ – определяется

как коэффициент влияния геометрии плоскости отделения монолита на среднюю величину производительности резания от ее максимального значения.

Отличительной особенностью поперечного пропила, отделяющего монолит камня от массива, является его вытянутая в вертикальном направлении прямоугольная форма, когда длина плоскости отделения равна ширине монолита $k_\phi = B/H$, и при этом выполняется геометрическое условие $k_\phi \leq 1$. В этом случае максимальная высота пропила не равна высоте монолита и находится из уравнения (рис. 3)

$$h_{нр} = H \cdot \frac{k_\phi \cdot \left(2 - k_\phi - \frac{D}{2H} \right)}{\left(1 - \frac{D}{2H} \right)},$$

что в итоге изменит величину коэффициента K_m в формуле (7), расчетная величина которого в этом случае

$$K_m = \frac{\left(2 - \frac{D}{H} \right)}{\left[k_\phi + \frac{3}{4} - \frac{(\pi + 2)}{8} \cdot \frac{D}{H} \right] \cdot \left(4 - 2k_\phi - \frac{D}{H} \right)}. \quad (8)$$

Очевидно, что при условии $k_\phi = 1$ коэффициенты K_m в формулах (7) и (8) равны.

На рис. 4 приведен график зависимостей расчетных величин дополнительного угла охвата ϕ_0 и коэффициента K_m от значения k_ϕ , которое характеризует на практике геометрию плоскостей отделения монолита от массива как в поперечном ($k_\phi = 0,15 \div 0,4$), так и продольном ($k_\phi = 1,0 \div 2,0$) направлениях.

Коэффициент K_m устанавливает влияние геометрии пропила на среднюю величину производительности резания от ее максимального значения при работе канатной пилы в режиме, когда $V_{II} = \text{const}$ на протяжении всего периода распиловки плоскости отделения монолита. При этом согласно принятому алмазосберегающему режиму скорость подачи канатной пилы вдоль ее направляющих на основании вышеполученных выражений определяется по следующей зависимости:

$$V_{II} = k_H \cdot \frac{\mu_p \cdot k_{II} \cdot \sigma_n^{on} \cdot V_p}{A_{уд}}, \quad (9)$$

где $k_H = \frac{7\pi}{10}$ – для продольной плоскости отделения монолита от массива, когда $k_\phi = 1,0 \div 2,0$;

$k_H = \left(\frac{5}{9} \div \frac{2}{3} \right) \pi$ – для поперечной плоскости, когда $k_\phi = 0,15 \div 0,4$.

Данные значения коэффициента k_H приведения максимальной длины контакта гибкого инструмента к высоте пропила следуют из рис. 4, где в графическом виде показано изменение угла ϕ_0 от k_ϕ

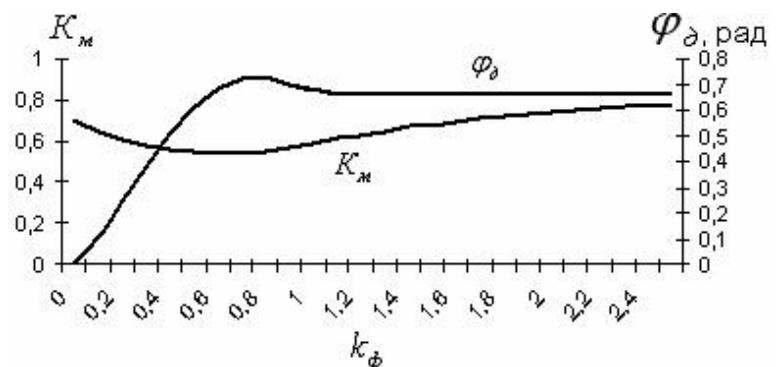


Рис. 4. График зависимости коэффициента K_m и дополнительного угла охвата ϕ_0 от величины коэффициента формы k_ϕ плоскостей отделения монолита от массива

В табл. 1 приведены расчетные значения технологических параметров и показателей отделения монолитов в алмазосберегающем режиме работы канатной пилы для условий Коелгинского месторождения мрамора. В расчетах принято: $\sigma_n^{on} = 0,22$ МПа; $A_{y\delta} = 0,75 \cdot 10^9$ Дж/м³; $\mu_p = 0,3$; $k_{II} = 0,16$; $b = 0,01$ м.

Расчеты выполнялись для работающих в настоящее время канатно-алмазных пил фирмы производителя «Micheletti» – Telestar 2002 G, техническая характеристика которых: $N_{к.н.} = 37$ кВт; $V_p = 32$ м/с; $D = 1,0$ м.

Суммарное время пиления продольной и поперечной плоскостей отделения монолита от массива (см. табл. 1) с учётом их суммарной площади определяет среднюю суммарную производительность канатной пилы:

$$\sum \Pi_{cp} = S^c / t^c, \quad (10)$$

где S^c – суммарная площадь продольной и поперечной плоскостей отделения монолитов камня от массива; t^c – суммарное время пиления продольной и поперечной плоскости.

В зависимости от того, какой силовой режим реализуется в процессе всего цикла пиления, будет зависеть и величина средней производительности проходки отдельных плоскостей отделения и их средняя суммарная величина.

Аналитическое выражение для определения показателя наработки запишем в следующем виде [5]:

$$H = t_{ai} \cdot \sum \Pi_{cp}, \quad (11)$$

где t_{ai} – время абразивного износа алмазосносного слоя на рабочих элементах втулках одного погонного метра инструмента.

Время t^c находится как результат замера в условиях промышленной эксплуатации канатных пил, либо путем расчета по вышеизложенной методике.

Время t_{ai} также может быть определено из практики, расчетное значение находится следующим образом [5]:

$$t_{ai} = \mathcal{E}_a \cdot \frac{W_a}{P_{p.a} \cdot V_p} \cdot \frac{\mu_{p.a}}{\mu} \cdot \frac{A_{y\delta}}{R_{y\delta}} \cdot \frac{W_a}{V_p}, \quad (12)$$

где W_a – объем изношенного алмазосносного слоя на рабочих элементах (втулках); $P_{p.a}$ – сила разрушения алмазосносного слоя, Н; \mathcal{E}_a – показатель энергоёмкости разрушения алмазосносного слоя, МПа; $\mu_{p.a}$ – показатель разрушения алмазосносного слоя; $R_{y\delta}$ – относительный расход алмазного инструмента.

Суммарный объем алмазосносного слоя по длине контура равен:

$$W_a = \frac{\pi}{4} \cdot d_s^2 \cdot (\lambda^2 - \gamma^2) \cdot R_n \cdot L_K, \quad (13)$$

где $\lambda = d_0/d_{кз}$, d_s – внешний диаметр алмазорежущей втулки, $d_{кз}$ – диаметр несущего каната; $\gamma = d_0/d_{кз}$, d_0 – внешний диаметр металлической втулки, на которой расположен алмазосносный слой; k_n – коэффициент прерывистости режущей поверхности инструмента; L_K – длина режущего контура, м.

Силу разрушения (абразивного износа) алмазосносного слоя согласно [4] запишем как

$$P_{p.a} = \mu_{p.a} \cdot \frac{(e^{\mu\varphi} - 1)}{\mu} \cdot P_0 \cdot k_\varphi \cdot \frac{\mu_{p.a}}{\mu} \cdot \frac{P_{np}}{[n]}, \quad (14)$$

где $P_{np} = \frac{\pi \cdot d_k^2}{4} \cdot k_3 \cdot \sigma_s$ – продольная сила, приводящая к статическому разрыву каната, Н; k_3 – коэффициент заполнения сечения каната металлом; σ_s – временное сопротивление разрыву материала канатной проволоки, Па; φ – угол контакта инструмента с распиливаемой породой, рад; P_0 – усилие предварительного натяжения каната, Н; $[n] = P_{np} / P_{max}$, P_{max} – максимальная сила натяжения каната, Н; k_φ – коэффициент полезного использования несущей способности гибкого режущего инструмента.

Сила P_{max} действует на ведущей ветке каната и всегда ограничивается установленной мощно-

Таблица 1

Расчет технологических параметров и показателей

Параметр	Плоскость отделения монолита мрамора от массива	
	продольная	поперечная
Размер плоскости отделения ($L \times H$; $B \times H$), м	12,0×6,0	1,85×6,0
Коэффициент формы k_φ	2,0	0,308
Значение коэффициента K_m	0,76	0,59
Максимальная мощность распиловки N_{max} , кВт	37	17,3
Скорость подачи V_{II} , м/мин	0,049	0,042
Максимальная производительность Π_{max} , м ² /ч	17,74	8,28
Средняя производительность Π_{cp} , м ² /ч	13,27	4,28
Время пиления, ч	5,42	2,27
Средняя суммарная производительность $\sum \Pi_{cp}$, м ² /ч	10,8	

стью главного привода канатной пилы N через величину предельно возможной силы распиловки P_{max} , так как

$$P_{max} = \frac{P_{рас}}{k_{\phi}} \leq \frac{1}{k_{\phi}} \cdot \frac{N}{V_p} \quad (15)$$

Соотношение (15) дает возможность рассчитать минимальное значение коэффициента запаса прочности несущего каната по статической нагрузке из условия конкретно установленной мощности главного привода канатной пилы:

$$[n] \geq k_{\phi} \cdot \frac{P_{мп}}{N} \cdot V_p \quad (16)$$

С учетом формул (13) и (14) получим окончательное выражение для расчета времени разрушения алмазоносного слоя:

$$t_{ai} = K_a (\lambda^2 - \gamma^2) \frac{L_K}{V_p} \quad (17)$$

где $K_a = \frac{A_{y\delta}}{R_{y\delta}} \cdot \frac{k_{II} \cdot [n]}{\sigma_e \cdot k_3 \cdot k_{\phi}}$

В табл.2 приведено расчетное значение времени t_a , в течение которого происходит полный износ алмазоносного слоя на рабочих элементах в зависимости от толщины слоя, т.е. показателя λ .

Численные расчеты по определению t_a выполнялись для следующих показателей и параметров: $A_{y\delta}=0,665 \cdot 10^9$ Дж/м³; $V_p=32$ м/с; $L_K=40,5$ м.

Максимальное расчетное значение наработки в соответствии с формулой (11) было получено при: $L_K=1$ м, $S^c=83,1$ м²; $t^c=7,69$ ч; $t_{ai}=3,84$ ч/пог.м.

Таблица 2

Показатели износа алмазоносного слоя в зависимости от его толщины h

h , мм	1,25	1,125	1,0	0,875	0,75	0,625	0,5	0,375
λ	2,00	1,95	1,90	1,85	1,80	1,75	1,70	1,65
t_a , ч	82	72	63	54	47	37	30	21

Таблица 3

Расчет минимальных удельных затрат при отделении монолита по вертикальным плоскостям

Показатель	Значение
$C_{AO+3П}$, руб./м ²	15,30
$C_{ЭЭ}$, руб./м ²	3,30
$C_{АН}$, руб./м ²	41
C_S , руб./м ²	59,6
C_V , руб./м ³ , при $K_B=0,5$	73,9

Для алмазного инструмента, изготовленного на связке М1 с использованием природных алмазов марки А, зернистостью 500/400, 50% концентрации, расчетная наработка составила $H^{max}=36,6$ м²/пог.м.

Полученные результаты показывают, что установленная мощность канатной пилы, перемещаемой с постоянной скоростью её подачи на забой, высота добычного уступа и форма вертикальных плоскостей отделения монолита от массива задают силовой режим контактного взаимодействия системы «порода – инструмент», значение которого должно соответствовать минимальному удельному расходу алмазного инструмента. Это обеспечивает максимальную наработку гибкого алмазного инструмента и, таким образом, минимальные удельные эксплуатационные затраты по распиловке единицы поверхности плоскостей отделения монолита от массива.

Как уже отмечалось, процесс добычи блоков по двухстадийной схеме получил широкое применение как наиболее эффективный способ повышения выхода конечной продукции при этом, в качестве оптимизационного критерия экономической оценки примем условие, при котором удельные затраты по подготовке монолита к выемке путем прорезания направленных щелей в массиве должны быть минимальными, т.е.:

$$C_v = \frac{C_s \times S_m}{K_B} \rightarrow \min \quad (18)$$

где C_s – удельные затраты, связанные с резанием камня при отделении монолита от массива, руб./м²; S_m – удельная площадь обнажения монолита в массиве, м⁻¹; K_B – коэффициент выхода товарных блоков из объема монолита.

Удельные затраты на резание камня согласно работе [6]

$$C_s = \frac{C_o}{K_{НО} \cdot \sum \Pi_{cp}} + C_3 \cdot N_{y\delta} + \frac{C_u}{H^{max}} = C_{AO+3П} + C_{ЭЭ} + C_{АН} \quad (19)$$

где C_o , C_3 , $C_{АН}$ – удельные стоимости соответственно эксплуатации канатной пилы, руб./ч; электроэнергии, руб./кВт·ч; алмазного инструмента, руб./пог.м; $N_{y\delta} = N^{max} / \Pi_{max}$ – удельная мощность распиловки, кВт·ч/м³; $K_{НО}$ – коэффициент использования оборудования.

В данном уравнении первое слагаемое представляет собой затраты на амортизационные отчисления камнерезного оборудования с учетом затрат на обслуживание и ремонт и заработную

плату оператору канатной машины. Второе слабое – это затраты на электроэнергию, потребляемую двигателем в процессе пиления. Третье слабое показывает затраты, связанные с расходом алмазного инструмента.

Численный расчет выполнен для: $K_{ио}=0,75$; $C_0=124$ руб./ч; $C_э=1,5$ руб./кВт·ч; $C_{и}=1500$ руб./пог.м; $S_M=0,62$ м²/м³, значения его представлены в **табл. 3**.

Анализ расчетных данных показывает на преобладающее положение удельных расходов по приобретению и использованию алмазно-канатного инструмента (69%) в балансе эксплуатационных затрат по отделению монолита от массива вертикальными плоскостями, что полностью под-

тверждается и практикой и эксплуатации канатных пил. Однако данная доля затрат может существенно измениться, если процесс распиловки вести в неалмазосберегающем силовом режиме. В этом случае суммарные эксплуатационные затраты увеличатся по отношению к их минимальному значению за счет повышения удельного расхода гибкого алмазного инструмента.

Так, повышение удельного расхода инструмента на 20% по отношению к минимально возможному значению дает годовое увеличение расходов по приобретению дополнительного количества инструмента на одну канатную пилу в количестве 200 тыс. рублей.

Библиографический список

1. Першин Г.Д., Караулов Н.Г., Караулов Г.А. Добыча блоков мрамора алмазно-канатными пилами: Учеб. пособие. Магнитогорск: МГТУ, 2003. 103 с.
2. Першин Г.Д. Энергетический принцип расчета поверхностного разрушения горных пород алмазно-абразивным инструментом // Изв. вузов. Горный журнал. 1992. № 6. С. 69–76.
3. Першин Г.Д., Утешев В.А. Расчет производительности канатно-алмазной пилы при постоянной скорости ее подачи на забой // Добыча, обработка и применение природного камня: Сб. науч. тр. № 7. Магнитогорск: МГТУ, 2007. С. 4–12.
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, 1983. С. 40–49.
5. Першин Г.Д., Чеботарев Г.И. Расчет и конструирование канатно-алмазного режущего инструмента // Добыча, обработка и применение природного камня: Сб. науч. тр. № 2. Магнитогорск: МГТУ, 2002. С. 79–98.
6. Першин Г.Д. Технично-экономическое обоснование технологических параметров процесса резания камня канатно-алмазными пилами // Строительные материалы. 1994. № 8. С. 4–6.