

УДК 622.24.08

Реготунов Андрей Сергеевич

кандидат технических наук,
старший научный сотрудник,
лаборатория разрушения горных пород,
Институт горного дела УрО РАН,
620075, г. Екатеринбург,
ул. Мамина-Сибиряка, 58
e-mail: pochta8400@inbox.ru.

О ВЛИЯНИИ НЕКОТОРЫХ ФАКТОРОВ НА ВЕЛИЧИНУ ПОКАЗАТЕЛЯ ЭНЕРГОЕМКОСТИ РАЗРУШЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД В ПРОЦЕССЕ ШАРОШЕЧНОГО БУРЕНИЯ ВЗРЫВНЫХ СКВАЖИН*

Аннотация:

В настоящее время в Институте горного дела Уральского отделения Российской академии наук продолжается разработка метода экспрессного выявления информации о состоянии массива горных пород в процессе шарошечного бурения взрывных скважин, учитывающего величину показателя энергоемкости разрушения горных пород. Поэтому актуальной задачей является выявление факторов, влияющих на этот показатель в процессе бурения с целью получения объективной информации о структурно-прочностных свойствах массива горных пород. Представлена классификация основных факторов, влияющих на энергоемкость разрушения горных пород при бурении взрывных скважин в локальных массивах горных пород. Приводится краткий обзор состояния исследований в области изучения взаимосвязи энергоемкости бурения с важнейшими факторами – состоянием зубьев шарошечного долота и условиями удаления продуктов разрушения горных пород с забоя скважины. Поставлена цель исследования: определить влияние фактора абразивного истирания зубьев шарошечного долота при различных условиях удаления продуктов разрушения с забоя скважины на величину показателя энергоемкости, для чего выполнены аналитические расчеты энергоемкости разрушения горной породы в зависимости от определяющих параметров. В исследованиях принято, что бурение взрывных скважин происходит в крепких, очень крепких и в высшей степени крепких горных породах. Рассмотрено три основных степени абразивного истирания зубьев шарошечного долота. Каждая степень абразивного истирания зубьев шарошечного долота обуславливает возникновение и протекание в определенных границах характерного механизма разрушения горной породы. Изменение условий удаления продуктов разрушения предложено оценивать через снижение расхода сжатого воздуха, подаваемого в скважину. Выполнен анализ результатов расчета и представлены выводы.

Ключевые слова: массив горных пород, бурение, скважина, энергоемкость, факторы, шарошечное долото, зубья, абразивное истирание, расход сжатого воздуха, продукты разрушения.

DOI: 10.25635/2313-1586.2020.03.041

Regotunov Andrey S.

Candidate of Technical Sciences,
Senior Researcher,
Institute of Mining, Ural Branch of RAS,
620075 Ekaterinburg,
58 Mamina-Sibiryaka Str.
e-mail: pochta8400@inbox.ru

ON THE INFLUENCE OF SOME FACTORS ON THE VALUE OF THE ENERGY INTENSITY INDICATOR FOR ROCK DESTRUCTION DURING ROLLER-BIT DRILLING OF BLASTHOLES

Abstract:

Currently, Institute of Mining of the Ural branch of the Russian Academy of Sciences continues to develop the method of express identification of information about the state of a rock massif in the process of roller-bit drilling of blastholes, taking into account the value of the indicator of the energy intensity of rock destruction. Therefore, it is an urgent task to identify the factors which affect the energy intensity of rock destruction during drilling in order to obtain objective information about the structural and strength properties of the rock massif. We present a classification of the main factors affecting the energy intensity of rock destruction during drilling of blastholes in local rock massif. The article provides a brief overview of the state of research in the field of exploring the relationship of drilling energy intensity with the most important factors – such as state of rock-bit teeth and conditions of removing the destruction products of rocks from the blasthole. In the result, the author sets the goal of the study: to determine the effect of abrasive detrition of rock-bit teeth under different conditions of ore products removing from the bottom of the blasthole by the amount of energy intensity. To achieve this goal, we have performed analytical calculations of the energy intensity of rock destruction, depending on defining parameters. In research, it is accepted that the drilling of a blasthole occurs in strong, very strong and extremely strong rocks. Three main degrees of teeth abrasive detrition of a rotary cone bit are considered. Each degree of abrasive detrition of the teeth on a rotary cone bit causes the appearance and flow within certain boundaries of the characteristic mechanism of rock destruction. The change in the conditions for removal of fracture products is proposed to evaluate by reducing the flow of compressed air supplied to the blasthole. The calculation results were analyzed and conclusions are presented.

Key words: rock massif, blasthole drilling, energy intensity, factors, rotary cone bit, teeth, abrasive detrition, compressed air consumption, products of destruction.

* Исследования выполнены в рамках Государственного задания №075-00581-19-00, тема №0405-2019-0005 (2019 – 2021 гг.)

Введение

При экспрессном методе определения структурно-прочностных характеристик массива горных пород в процессе шарошечного бурения взрывных скважин, разработка которого продолжается в ИГД УрО РАН [1 – 4], в качестве показателя, обеспечивающего объективную информацию о его состоянии, принят показатель энергоемкости разрушения породы. На величину данного показателя влияние оказывают три группы основных факторов (рис.1).



Рис.1 – Основные факторы, влияющие на энергоемкость разрушения горных пород при шарошечном бурении взрывных скважин

Для правильной интерпретации данных, получаемых в процессе шарошечного бурения, особое значение имеет информация о том, как влияет на изменение показателя энергоемкости разрушения горной породы состояние бурового инструмента и условия удаления продуктов разрушения с забоя скважины. В современных исследованиях [5 - 8] с достаточной детальностью не раскрывается взаимосвязь между энергоемкостью разрушения породы при бурении скважины, техническим состоянием бурового инструмента, условиями удаления продуктов разрушения скважины. Тем не менее согласно фрагментарным данным [9] известно, что показатель энергоемкости разрушения крепких и очень крепких горных пород увеличивается до 1,7 раз при уменьшении вылета твердосплавных зубьев шарошечного долота до предельной величины, то есть до $0,6h$, где h – длина зуба. Напротив, в работе [10] говорится, что влияние абразивного истирания зубьев шарошечного долота на величину показателя энергоемкости незначительно и заключается в повышении показателя на 10 – 15% к концу срока службы долота. Согласно исследованиям [11 – 13] ухудшение условий удаления продуктов разрушения скважины приводит к переизмельчению бурового шлама и повышенному износу зубьев, корпуса шарошечного долота, что обуславливает увеличение энергоемкости бурения скважины. Таким образом, недостаточная изученность и отсутствие целостной картины количественного влияния перечисленных факторов сдерживает корректное применение показателя энергоемкости разрушения для анализа состояния горных пород в локальных массивах, намеченных к буровзрывной выемке. Поэтому цель исследования заключалась в определении влияния состояния бурового инструмента, а именно абразивного истирания твердосплавных зубьев шарошечного долота и условий удаления продуктов разрушения на величину показателя энергоемкости разрушения горной породы в процессе бурения взрывных скважин.

Методика исследования

Математические расчеты выполнены на основе выражений, приведенных в работах Г.М. Крюкова [14], Р.Ю.Подэрни [15], Н.Н. Чулкова [16]. В расчетах приняты граничные условия: диаметр взрывных скважин – 244,5 мм; взрывные скважины являются вертикально направленными; массив горных пород сложен однородно крепкими, очень крепкими и в высшей степени крепкими горными породами; коэффициент крепости горных пород по шкале проф. М.М. Протоdjeяконова f составляет 13, 15, 17, 19 ед. Бурение скважин происходит на рациональных режимах. В процессе бурения скважины контактная поверхность каждого зуба шарошечного долота при взаимодействии с горной породой испытывает абразивное истирание. В исследованиях рассмотрено три основных степени абразивного истирания зубьев шарошечного долота, каждая из которых обуславливает возникновение и развитие характерного типа механизма разрушения горной породы с соответствующими параметрами (табл. 1).

Таблица 1

Влияние степени абразивного истирания зубьев шарошечного долота на параметры возникающих механизмов разрушения горной породы при бурении [14]

Характеристика	Степень абразивного истирания зубьев		
	I	II	III
Тип механизма разрушения	Мелкодисперсное дробление горной породы с многочисленными сколами по краям лунки	Интенсивное мелкодисперсное дробление горной породы без выраженных сколов по краям лунки	Поверхностное истирание горной породы (выраженная лунка не образуется)
Глубина внедрения зубьев h_b , мм	$\geq 1,0; \leq 1,6$ мм	$\geq 0,8; < 1,0$	$\geq 0,4; < 0,6$
Глубина разрушения h_p , мм	$\geq 2,2; \leq 4,16$	$\geq 1,44; < 2,0$	$\geq 0,4; < 0,96$
Параметр κ , характеризующий отношение глубины разрушения h_p к глубине внедрения зубьев h_b в горную породу	$\geq 2,2; \leq 2,6$	$\geq 1,8; < 2,0$	$\geq 1,0; < 1,6$

* В исследованиях принят значимый для практики диапазон изменения глубины внедрения h_b .

Принято, что удаление продуктов разрушения с забоя скважины осуществляется винтовым компрессором с производительностью 32 м³/мин. Для исследования влияния изменения условий удаления продуктов разрушения с забоя скважины на показатель энергоемкости в расчетах дополнительно рассмотрены варианты применения компрессоров производительностью 25 и 20 м³/мин. Для пылеподавления принято, что на забой скважины подается вода, объемный расход которой составляет 15 л/мин (0,00025 м³/с).

При расчете показателя энергоемкости разрушения горной породы при шарошечном бурении e_p (кВтч/м) взрывной скважины учитывалась мощность двигателя вращателя $N_{кр}$ (кВт) и механическая скорость бурения V_6 (м/ч):

$$e_p = N_{кр} / V_6 \quad (1)$$

Мощность двигателя вращателя $N_{кр}$ (кВт) определена согласно [15]:

$$N_{кр} = 10^{-3} \cdot M_{кр} \omega_{вр} / \eta_{вр} \quad (2)$$

где $\eta_{вр}$ – коэффициент полезного действия трансмиссии вращателя (0,75); $\omega_{вр}$ – угловая скорость вращения шарошечного долота, рад/с.

Крутящий момент шарошечного долота (Н·м) рассчитан согласно [16]:

$$M_{кр} = \frac{1}{3} D F_{ш} k_{тр} \cdot 10^{-2}, \quad (3)$$

где $F_{ш}$ – полное сопротивление, преодолеваемое механизмом вращателя, Н; D – диаметр шарошечного долота, см; $k_{тр}$ – коэффициент, учитывающий трение в подшипниках шарошек и бурового става о стенки скважины (1,5).

$$F_{ш} = 0,5 h_b D \sigma_6 z_{ш} \cdot 10^{-4}, \quad (4)$$

где h_b – глубина внедрения зубьев шарошки в породу, см; σ_6 – прочность породы при вращательном бурении, Па ($\sigma_6 = 10^7 f$); $z_{ш}$ – число шарошек в шарошечном долоте.

Для характеристики условий очистки забоя скважины от продуктов разрушения проведены расчеты безразмерного параметра согласно [14]:

$$\bar{q} = q_1 + q_2 / Q, \quad (5)$$

где q_1 – объем шлама, образующегося в единицу времени, м³/с; q_2 – объем воды, подаваемой в единицу времени для пылеподавления в скважину, м³/с (0,00025); Q – объем воздуха, подаваемого компрессором в единицу времени на забой скважины по внутренней полости штанг, м³/с.

$$q_1 = 0,25 \pi V_6 D^2. \quad (6)$$

Расчетные значения \bar{q} сравнивались с критическим значением \bar{q}_* . Если установленное значение \bar{q} оказывалось меньше критического значения $1 \cdot 10^{-3}$, то принималось согласно [14], что в процессе бурения скважины происходит совершенная очистка от продуктов разрушения. Однако если установленные значения оказывались больше критического значения, то дополнительно определялся коэффициент k_1 , учитывающий влияние на величину механической скорости бурения несовершенных условий очистки забоя скважины от продуктов разрушения [14]:

$$k_1 = 0,17 \cdot \bar{q}_*^4 / [0,17 \cdot \bar{q}_*^4 + (\bar{q} - \bar{q}_*)^4]. \quad (7)$$

Далее с учетом установленных значений k_1 значения механической скорости бурения корректировались.

Механическая скорость V_6 (м/ч) шарошечного бурения скважины определялась согласно выражению [14]:

$$V_6 = 3,6 n k_2 \chi h_b, \quad (8)$$

где n – частота вращения долота, с⁻¹ (1,33); k_2 – коэффициент, учитывающий долю забоя, разрушаемую за один оборот долота (см. табл.2); χ – безразмерный параметр (см. табл.1); h_b – глубина лунки разрушения, мм (см. табл.1).

Коэффициент k_2 , учитывающий долю забоя, разрушаемую за один оборот шарошечного долота, определялся в зависимости от параметра \bar{b} (см. табл.2):

$$\bar{b} = 2b/t, \quad (9)$$

где $2b$ – ширина лунки разрушения, м; t – шаг зубьев на венцах шарошек (0,020), м.

Таблица 2

Условия для определения значений коэффициента k_2 , учитывающего долю забоя за один оборот долота [14]

Условие	Значение k_2
$\bar{b} \geq 1$	1
$0.6 \leq \bar{b} \leq 1$	\bar{b}
$0.25 \leq \bar{b} \leq 0.6$	$\bar{b}(\bar{b} - 0.25/0.35)$

Результаты исследования и их обсуждение

Результаты выполненных расчетов восполняют отмеченные недостатки предшествующих исследований и открывают возможность оценить изменение показателя энергоемкости разрушения горной породы в зависимости от варьирования фактора абразивного истирания зубьев шарошечного долота в широком интервале с учетом изменения условий удаления продуктов разрушения из скважины (рис. 2 – 3).

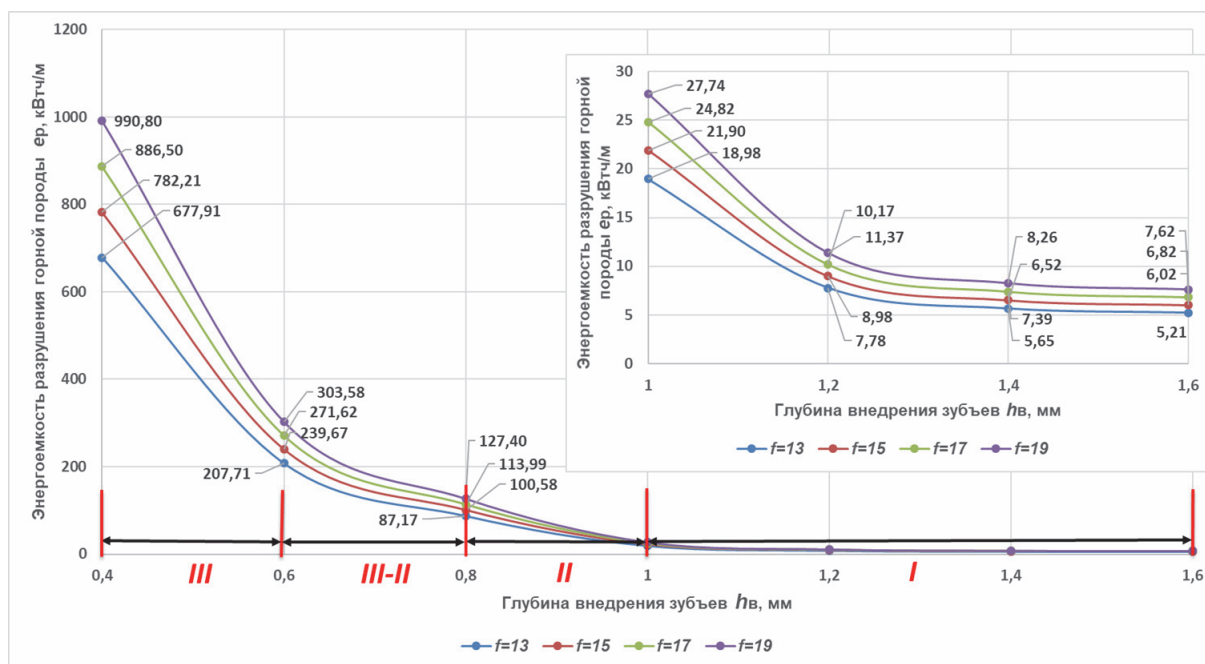


Рис. 2 – Графики изменения показателя энергоемкости разрушения горных пород при бурении скважины в зависимости от степени абразивного истирания зубьев шарошечного долота

Анализ результатов расчета, представленных на рис. 2, позволил сделать следующие выводы. Энергоемкость разрушения горной породы увеличивается с ростом коэффициента крепости горной породы f по шкале проф. М.М. Протоdjяконова и значительно зависит от степени абразивного истирания зубьев шарошечного долота. При I степени абразивного истирания зубьев шарошечного долота (см. рис.2), вызывающего ограничение глубины внедрения зубьев от 1,6 до 1,0 мм, происходит образование глубоких и широких лунок на забое скважины за счет механизма мелкодисперсного дробления горной породы с многочисленными сколами по краям лунок. При этом энергоемкость разрушения горной породы в исследуемом диапазоне сокращения глубины внедрения зубьев одинаково увеличивается в 3,6 раз при всех принятых значениях коэф-

коэффициента крепости f по шкале проф. М.М. Протодяконова. Механическая скорость бурения снижается в 5,8 раз. При **II** степени абразивного истирания зубьев глубина их внедрения в горную породу варьируется от 1,0 до 0,8 мм. Внедрение зубьев шарошечного долота в поверхность скважины происходит за счет малоэффективного и энергоемкого механизма разрушения, при котором число сколов по краям лунок многократно меньше, чем при внедрении зубьев с **I** степенью абразивного истирания. Соответственно этому уменьшается и полезный объем разрушения забоя скважины за один оборот шарошечного долота. Энергоемкость разрушения горной породы для исследуемого диапазона изменения глубины внедрения зубьев возрастает одинаково в 4,6 раз при всех принятых значениях коэффициента крепости f по шкале проф. М.М. Протодяконова. Механическая скорость бурения в указанном диапазоне значительно снижается – в 5,7 раз. Дальнейшее продолжение абразивного истирания зубьев бурового инструмента вызывает переходную степень **II – III** (см. рис.2), в процессе развития которой контактные напряжения в горной породе быстро снижаются, что приводит к стремительному сокращению глубины, ширины образующихся лунок и полезного объема разрушения забоя скважины за один оборот шарошечного долота. В итоге создаются такие условия, когда контактные напряжения не превышают предела прочности горной породы и в процессе бурения фактически прекращается ее разрушение: происходит только выкрашивание зерен горной породы и их отдельных агрегатов с поверхности забоя скважины, усиленное абразивное истирание зубьев и корпуса долота с интенсивным выделением тепловой энергии. Указанные особенности разрушения горной породы в процессе бурения характерны при **III** предельной степени абразивного истирания зубьев. При предельном абразивном истирании зубьев шарошечного долота механическая скорость бурения близка к нулю, а энергоемкость разрушения горной породы при ограничении глубины внедрения в исследуемом диапазоне с 0,6 до 0,4 мм с учетом переходной степени **II – III** одинаково возрастает в 7,78 раз при всех принятых значениях коэффициента крепости f по шкале проф. М.М. Протодяконова.

Сравнение расчетных данных с экспериментальными [2, 3, 9, 10] показало, что в практике шарошечного бурения взрывных скважин в крепких, очень крепких и в высшей степени крепких горных породах применение шарошечных долот происходит до начала наступления **II** и **III** степеней абразивного истирания зубьев. Это подтверждается тем, что выявленные на практике значения показателя энергоемкости разрушения горных пород не превышают расчетных значений – 18,98 – 27,74 кВтч/м (см. рис. 2), соответствующих первой степени абразивного истирания зубьев шарошечного долота.

Результаты исследования дополнительного влияния изменения условий удаления с забоя скважины продуктов разрушения крепких, очень крепких и в высшей степени крепких горных пород на величину показателя энергоемкости представлены на рис. 3, $a - z$.

В результате расчетов установлено, что когда удаление продуктов разрушения с забоя скважины обеспечивается расходом воздуха и воды, 32 м³/мин и 15 л/мин (см. рис. 2 и 3, $a - z$), соответственно, то при принятых граничных условиях дополнительного увеличения показателя энергоемкости разрушения крепких, очень крепких и в высшей степени крепких горных пород ($f=13, 15, 17, 19$) не происходит. Такие условия способствуют полному выносу бурового шлама с забоя скважины являются совершенными. Снижение расхода сжатого воздуха с 32 до 25 м³/мин (при неизменном расходе воды – 15 л/мин), то есть в 1,28 раз, оказывает влияние при **I** степени абразивного истирания зубьев (см. рис.2), когда глубина и в целом объем разрушения забоя скважины значительны. Начиная с 1,6 и до 1,4 мм, энергоемкость разрушения горной породы дополнительно увеличивается в 1,72 – 1,30 раз (см. рис. 3, $a - z$). Дальнейшее снижение расхода сжатого воздуха с 32 до 20 м³/мин, то есть в 1,6 раз, более выражено оказывает влияние на условия удаления продуктов разрушения из скважины и сопровождается

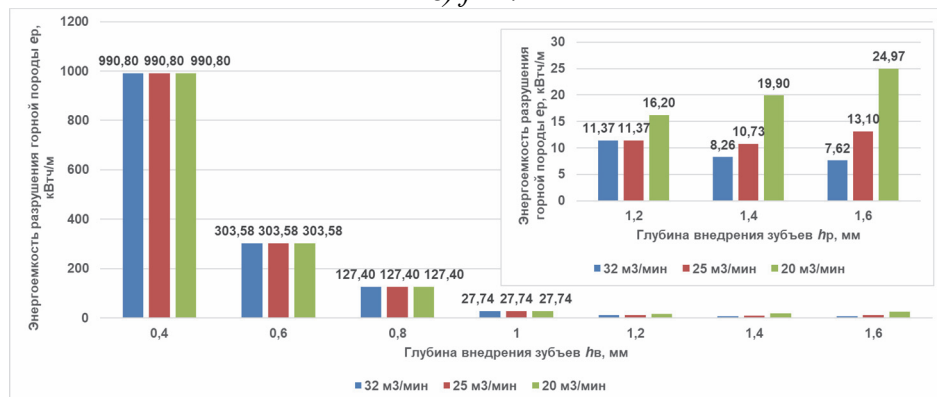
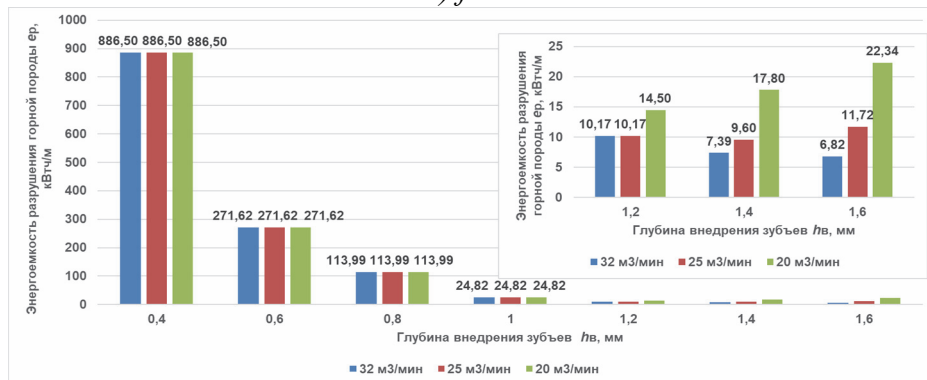
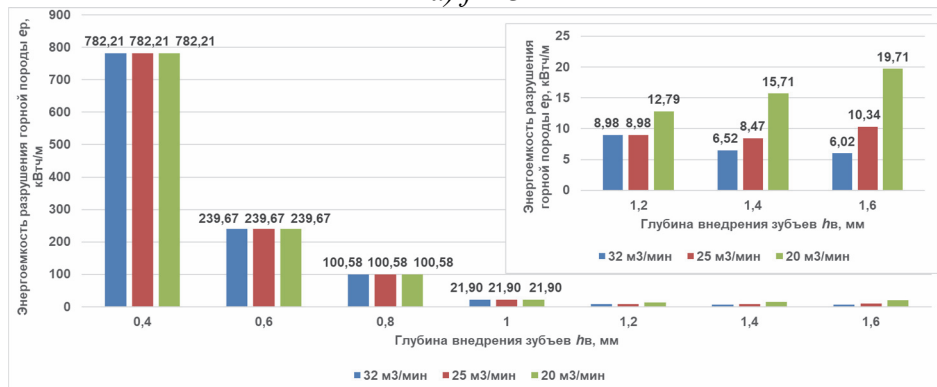
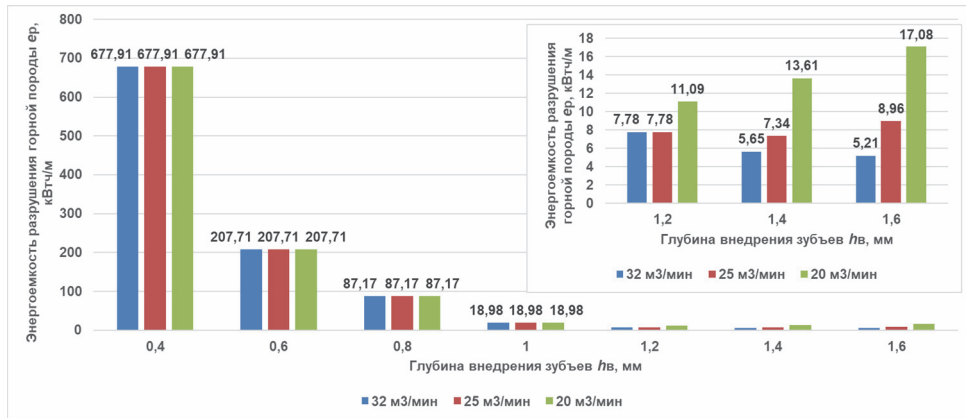


Рис. 3 – Диаграммы изменения энергоемкости разрушения горных пород в зависимости от условий удаления продуктов разрушения с забоя скважины при шарошечном бурении

существенным увеличением значений показателя энергоемкости. Повышение показателя энергоемкости разрушения горных пород в 3,28 – 1,43 раз (см. рис.3, $a - z$) происходит в диапазоне ограничения глубины внедрения от 1,6 до 1,2 мм, характерного для I степени абразивного истирания зубьев шарошечного долота (см. рис.2). Значительное в данном случае повышение энергоемкости разрушения горной породы объясняется тем, что при большем снижении расхода сжатого воздуха на забое скважины остается все больше частиц бурового шлама. В таких условиях возрастает доля мощности двигателя вращателя, затрачиваемой на процесс движения зубьев шарошечного долота через слой разрушенных частиц горной породы к ненарушенной поверхности забоя скважины. В результате происходит переизмельчение бурового шлама, существенное снижение объема образующихся лунок разрушения и общего объема отделяемой горной породы от массива за один оборот шарошечного долота на единицу расходуемой мощности двигателя вращателя. Установленные результаты исследования не противоречат данным работ [11 – 13] об увеличении величины показателя энергоемкости разрушения горных пород при ухудшении условий удаления продуктов разрушения из скважины на дневную поверхность и дополняют их.

Выводы

1. В результате исследований установлено, что физические процессы абразивного истирания зубьев шарошечного долота взаимосвязаны с процессами контактного разрушения горной породы в процессе бурения скважины, определяют механизм протекающих процессов разрушения горной породы и значительно влияют на величину показателя энергоемкости разрушения горной породы. При первой степени абразивного истирания зубьев шарошечного долота, когда глубина их внедрения в исследуемом диапазоне ограничена от 1,6 до 1 мм, энергоемкость разрушения горных пород повышается до 3,6 раз при всех принятых значениях коэффициента крепости по шкале проф. М.М. Протодьяконова. Абразивное истирание зубьев долота при второй степени, ограничивающее внедрение зубьев шарошечного долота в исследуемом диапазоне от 1 до 0,8 мм, для указанных горных пород вызывает увеличение энергоемкости до 4,6 раз при всех принятых значениях коэффициента крепости по шкале проф. М.М. Протодьяконова. При третьей (предельной) степени абразивного истирания зубьев шарошечного долота, когда допускается внедрение зубьев на глубину от 0,6 до 0,4 мм в исследуемом диапазоне, энергоемкость разрушения горной породы с учетом переходной степени абразивного истирания возрастает до 7,78 раз при всех принятых значениях коэффициента крепости по шкале проф. М.М. Протодьяконова.

2. Дополнительное повышение величины показателя энергоемкости разрушения горной породы в исследуемом диапазоне абразивного истирания зубьев шарошечного долота не происходит при совершенных условиях удаления продуктов разрушения с забоя скважины, когда расход воздуха и воды – 32 м³/мин и 15 л/мин, соответственно. Снижение расхода сжатого воздуха до 25 – 20 м³/мин при постоянном расходе воды – 15 л/мин, вызывает в процессе шарошечного бурения скважины неполное удаление продуктов разрушения с забоя скважины, их переизмельчение и снижение полезного объема разрушения забоя скважины за один оборот шарошечного долота. Снижение расхода сжатого воздуха от 32 до 25 м³/мин дополнительно повышает энергоемкость разрушения горной породы в 1,72 – 1,30 раз при ограничении глубины внедрения зубьев – от 1,6 до 1,4 мм. Снижение расхода сжатого воздуха от 32 до 20 м³/мин при ограничении глубины внедрения зубьев от 1,6 до 1,2 мм обуславливает увеличение показателя энергоемкости разрушения горной породы в процессе бурения в 3,28 - 1,43 раз.

3. Результаты исследования отображают изменения показателя энергоемкости разрушения горных пород в процессе шарошечного бурения в широком интервале варьирования фактора абразивного истирания зубьев шарошечного долота с учетом изменения фактора условий удаления продуктов разрушения с забоя скважины, требуют уточнения при стендово-промышленных испытаниях шарошечных долот в различных

по прочности горных породах, после чего их следует применять в качестве корректирующих коэффициентов для выявления количественного влияния на показатель энергоёмкости указанных факторов.

Список литературы

1. Regotunov A.S., Sukhov R.I., 2019. Development of Equipment for More Information About the Strength Properties of Rocks in the Operation of the Drilling Rig. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. Vol. 262: Geodynamics and Stress State of the Earth's Interior (GSSEI 2019), P. 1-4. DOI:10.1088/1755-1315/262/1/012057.
2. Сухов Р.И., Реготунов А.С., Гращенко Д.А., 2019. Развитие метода получения информации о состоянии массива горных пород в процессе бурения технологических скважин. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, № 11 (СВ 37), С. 446-454. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-11-37-446-454.
3. Реготунов А.С., Сухов Р.И., 2016. Результаты исследований прочностных свойств локальных массивов в процессе бурения с применением программно-аппаратного комплекса. *Проблемы недропользования*, № 4, С. 121-131. DOI: 10.18454/2313-1586.2016.04.121
4. Жариков С.Н., 2019. Разработка ресурсосберегающей технологии буровзрывных работ. *Известия Вузов. Горный журнал*, №1, С.21-32.
5. Hatherly P., Scheduling S.J., Leung R., Robinson D., 2015. Drill Monitoring Results Reveal Geological Conditions in Blasthole Drilling. *International Journal of Rock mechanics and Mining Sciences September*, 78, P. 144-154.
6. Krúpa V., M. Krul'áková, E. Lazarová, M. Labaš, K. Feriančíková, L. Ivaničová, 2018. Measurement, Modeling and Prediction of Penetration Depth in Rotary Drilling of Rocks. *Measurement*, Vol. 117., P. 165-175.
7. Kelessidis V.C., 2011. Rock Drillability Prediction from in situ Determined Unconfined Compressive Strength of Rock. *The Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, Vol. 111, P. 429-436.
8. Галченко Ю.П., 2016. Методика диагностики и текущего контроля дислокации прочных включений при ведении отбойки в слоистых массивах горных пород. *Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика*, Москва: Изд-во Научлитехиздат, №4, С. 22-28.
9. Сухов Р.И., Шахматов Д.С., Паньков И.В., Ивановский С.В., Вереса А.Ф., 1991. Об удельной энергоёмкости разрушения горных пород при бурении взрывных скважин. *Горный журнал*, №3, С. 26-28.
10. Мальгин О.Н., Рубцов С.К., Шеметов П.А., Шлыков А.Г., 2003. *Совершенствование технологических процессов буровзрывных работ на открытых горных работах*. Ташкент: Фан, 199 с.
11. Лопатин Ю.С., Осипов Г.М., Перегудов А.А., 1973. *Бурение взрывных скважин на карьерах*. Москва: Недра, 173 с.
12. Перетолчин В.А., 1975. *Вращательное бурение скважин на карьерах*. Москва: Недра, 125 с.
13. Карпов А.П., Ивашечкин В.И., 1972. Исследование влияния количества воздуха на стойкость шарошечных долот. *Горный журнал*, №8, С.73-74.
14. Крюков Г.М., 2007. *Физика разрушения горных пород при бурении и взрывании. Ч. II. Разрушение горных пород при бурении. Раздел I. Внедрение зубьев в разрушаемую породу. Ударно-вращательный способ бурения: учебное пособие*. Москва: Издательство Московского государственного горного университета, 106 с.
15. Подэрни Р.Ю., 1985. *Горные машины и комплексы для открытых работ*. Москва: Недра, 544 с.
16. Чулков Н.Н., 1987. *Расчет приводов карьерных машин*. Москва: Недра, 196 с.

References

1. Regotunov A.S., Sukhov R.I., 2019. Development of equipment for more information about the strength properties of rocks in the operation of the drilling rig. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. Vol. 262: Geodynamics and Stress State of the Earth's Interior (GSSEI 2019), P. 1-4. DOI:10.1088/1755-1315/262/1/012057.
2. Sukhov R.I., Regotunov A.S., Grashchenko D.A., 2019. *Razvitie metoda polucheniya informatsii o sostoyanii massiva gornykh porod v protsesse bureniya tekhnologicheskikh skvazhin* [Development of the Method for Obtaining Information about State of Rock Mass during the Drilling Process of Technological Boreholes]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'*, № 11 (SV 37), S. 446-454. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-11-37-446-454.
3. Regotunov A.S., Sukhov R.I., 2016. *Rezultaty issledovaniy prochnostnykh svoystv lokal'nykh massivov v protsesse bureniya s primeneniem programmno-apparatnogo kompleksa* [Results of Researching of Strength Properties of Local Massifs while Drilling Process Using Hardware and Software Complex]. *Problemy nedropol'zovaniya*, № 4, S. 121-131. DOI: 10.18454/2313-1586.2016.04.121
4. Zharikov S.N., 2019. *Razrabotka resursosberegayushchei tekhnologii burovzryvnykh работ* [Development of Resource-saving Drilling-and-lasting Technology]. *Izvestiya Vuzov. Gornyi zhurnal*, №1, S.21-32.
5. Hatherly P., Scheduling S.J., Leung R., Robinson D., 2015. Drill monitoring results reveal geological conditions in blasthole drilling. *International Journal of Rock mechanics and Mining Sciences September*, 78, P. 144-154.
6. Krúpa V., M. Krul'áková, E. Lazarová, M. Labaš, K. Feriančíková, L. Ivaničová, 2018. Measurement, modeling and prediction of penetration depth in rotary drilling of rocks. *Measurement*, Vol. 117., P. 165-175.
7. Kelessidis V.C., 2011. Rock drillability prediction from in situ determined unconfined compressive strength of rock. *The Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, Vol. 111, P.429-436.
8. Galchenko Yu.P., 2016. *Metodika diagnostiki i tekushchego kontrolya dislokatsii prochnykh vklyuchenií pri vedenii otboiki v sloistykh massivakh gornykh porod* [Method of Diagnosis and Ongoing Monitoring of Solid Inclusions Deployment while Breaking in Layered Rocks]. *Pribory i sistemy. Upravlenie, kontrol', diagnostika*, Moscow: Nauchlittekhizdat, №4, S. 22-28.
9. Sukhov R.I., Shakhmatov D.S., Pan'kov I.V., Ivanovskii S.V., Veresa A.F., 1991. *Ob udel'noi energoemkosti razrusheniya gornykh porod pri burenii vzryvnykh skvazhin* [On Energy Density of Rock Destruction while Drilling of Explosive Wells]. *Gornyi zhurnal*, №3, S. 26-28.
10. Mal'gin O.N., Rubtsov S.K., Shemetov P.A., Shlykov A.G., 2003. *Sovershenstvovanie tekhnologicheskikh protsessov burovzryvnykh работ na otkrytykh gornykh rabotakh* [Improvement of Technological Processes of Drilling-and-blasting Operations in Open-pit Mining]. Tashkent: Fan, 199 s.
11. Lopatin Yu.S., Osipov G.M., Peregudov A.A., 1973. *Bureníe vzryvnykh skvazhin na kar'erakh* [Drilling of Explosive Wells in Open-pit Mining]. Moscow: Nedra, 173 s.
12. Peretolchin V.A., 1975. *Vrashchatel'noe burenie skvazhin na kar'erakh* [Rotation Drilling of Explosive Wells in Open Pits]. Moscow: Nedra, 125 c.
13. Karpov A.P., Ivashechkin V.I., 1972. *Issledovanie vliyaniya kolichestva vozdukh na stoikost' sharoshechnykh dolot* [Study of Influence of Air Quantity on Stability of Roller Bits]. *Gornyi zhurnal*, №8, S.73-74.
14. Kryukov G.M., 2007. *Fizika razrusheniya gornykh porod pri burenii i vzryvanii. Ch. II. Razrushenie gornykh porod pri burenii. Razdel I. Vnedrenie zub'ev v razrushaemyu porodu. Udarno-vrashchatel'nyi sposob bureniya: uchebnoe posobie* [Physics of Rock Destruction by Drilling and Blasting. Part II. Rock Destruction during Drilling. Section I. Intro-

duction of Teeth into the Destroyed Rock Mass. Percussion-rotary Drilling Method: Text-book]. Moscow: Izdatel'stvo Moskovskogo gosudarstvennogo gornogo universiteta, 106 s.

15. Poderni R.Yu., 1985. *Gornye mashiny i komplekсы dlya otkrytykh работ* [Mining Machines and Complexes for Open Works]. Moscow: Nedra, 544 s.

16. Chulkov N.N., 1987. *Raschet privodov kar'ernykh mashin* [Calculation of Quarry Machine Drivegears]. Moscow: Nedra, 196 s.