

УСТАНОВЛЕНИЕ СКОРОСТИ ШАРОШЕЧНОГО И УДАРНО-ВРАЩАТЕЛЬНОГО БУРЕНИЯ СКВАЖИН С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЗАКОНА СОХРАНЕНИЯ ЭНЕРГИИ

В.Н. Тюпин

Белгородский государственный национальный исследовательский университет,
Белгород, Россия, e-mail: tyupinvn@mail.ru

Аннотация: Скорость шарошечного и ударно-вращательного бурения зависит от многочисленных факторов, которые в технической литературе объединены в четыре группы: свойства разрушаемой породы, параметры долота, условия взаимодействия долота с породой и режимы бурения. В литературных источниках приводится ряд весьма сложных формул, где для определения скорости бурения необходимо вначале устанавливать эмпирические коэффициенты, то есть использовать формулы в таком виде весьма затруднительно. Кроме того, формулы не учитывают трещиноватость массивов горных пород. С другой стороны, получение математических зависимостей, связывающих скорость бурения, режимы бурения и показатель буримости трещиноватых горных пород, позволит нормировать процесс бурения и корректировать параметры взрывных работ. Исследования проводились с целью определения скорости шарошечного и ударно-вращательного бурения скважин с использованием закона сохранения энергии. Использован метод математического моделирования, что позволило установить формулы расчета скорости бурения в массиве горных пород, которые учитывают режимы бурения, параметры долота, а также коэффициент крепости (прочность) горных пород и параметры трещиноватости массива. Доказана правомерность зависимостей скорости шарошечного и ударно-вращательного бурения. Достоверность зависимостей по определению скорости бурения может быть установлена путем проведения исследований на карьерах с фиксированием всех параметров и математической обработке данных. Математические зависимости, связывающие скорость бурения, режимы бурения, параметры долота и показатель буримости трещиноватых горных пород позволят нормировать процесс бурения и корректировать параметры взрывных работ.

Ключевые слова: шарошечное бурение, ударно-вращательное бурение, скорость бурения, закон сохранения энергии, трещиноватый горный массив, режимы бурения, показатель буримости.

Для цитирования: Тюпин В.Н. Установление скорости шарошечного и ударно-вращательного бурения скважин с использованием закона сохранения энергии // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2020. – № 6. – С. 76–84. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-6-0-76-84.

Finding velocity of roller-bit and rotary-percussive drilling using the energy conservation law

V.N. Tyupin

Belgorod State National Research University, Belgorod, Russia, e-mail: tyupinvn@mail.ru

Abstract: Velocity of roller-bit and rotary-percussive drilling depends on many factors distributed in 4 groups in technical literature: rock properties, bit parameters, bit-rock interaction conditions and drilling modes. Literature sources present some very complex formulas which need finding empirical coefficients before determining drilling velocity, i.e. the formulas are difficult to use. Moreover, the formulas neglect jointing of rock masses. At the same time, mathematical relations connecting drilling velocity, drilling mode and drillability of jointed rocks will make it possible to rate drilling processes and adjust blasting parameters. These studies aim to determine velocity of roller-bit and rotary-percussive drilling using the energy conservation law. The used method of mathematical modeling allowed obtaining formulas for rock drilling velocity with regard to drilling modes, bit parameters, factor of rock hardness (strength) and rock mass jointing. The validity of the relations of the roller-bit and rotary-percussive drilling velocity is proved. The reliability of the drilling velocity formulas can be determined by means of investigations performed in open pit mines, with recording of all parameters and with mathematical processing of the data. The mathematical relations connecting drilling velocity, drilling modes, drill bit parameters and drillability of jointed rocks will enable rating of drilling and adjustment of blasting patterns.

Key words: roller-bit drilling, rotary-percussive drilling, drilling velocity, energy conservation law, jointed rock mass, drilling modes, drillability.

For citation: Tyupin V.N. Finding velocity of roller-bit and rotary-percussive drilling using the energy conservation law. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020;(6):76-84. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-6-0-76-84.

Введение

Анализ отечественной и зарубежной технической литературы [1–18] показал, что скорость шарошечного и ударно-вращательного бурения зависит от многочисленных факторов, которые можно объединить в четыре группы [4]: свойства разрушаемой породы, параметры долота, условия взаимодействия долота с породой и режимы бурения.

Многочисленные теоретические исследования, проводимые для определения скорости бурения при шарошечном и ударно-вращательном бурении, позволили получить весьма сложные формулы с многочисленными коэффициентами, которые подчас необходимо определять опытным путем [1, 2, 4]. В целом скорость шарошечного бурения скважин определяется функцией вида [4]

$$v_6 = f(P_{oc}, n, Q, q_2, A_1, A_2), \quad (1)$$

где P_{oc} – осевое усилие; n – частота вращения; Q – расход воздуха, q_2 – расход воды; A_1 – группа физико-техни-

ческих параметров пород; A_2 – группа геометрических параметров шарошечного долота.

Скорость ударно-вращательного бурения скважин определяется функцией вида [4]

$$v_6 = f(P_{oc}, n, A_{уд}, n_1, Q, q_2, A_1, A_2), \quad (2)$$

где P_{oc} – осевое усилие; n – частота вращения; $A_{уд}$ – энергия удара; n_1 – частота ударов; Q – расход воздуха, q_2 – расход воды; A_1 – группа физико-технических параметров пород; A_2 – группа геометрических параметров долота для ударно-вращательном бурении.

Анализ литературы показал, что приведенные в технической литературе математические зависимости по определению скорости при шарошечном и ударно-вращательном бурении скважин не учитывают трещиноватость массивов горных пород. Кроме того, для определения скорости бурения необходимо определять ряд эмпирических коэффициентов, то есть использовать формулы

в таком виде весьма затруднительно. С другой стороны, получение математических зависимостей, связывающих скорость бурения, режимы бурения, параметры долота и показатель буримости трещиноватых горных пород, позволит (при наличии соответствующей аппаратуры, например системы автоматизированного учета «Wenco») нормировать процесс бурения и впоследствии корректировать параметры взрывных работ.

В связи с этим предложены математические модели, основанные на законе сохранения энергии, для определения скорости шарошечного и ударно-вращательного бурения скважин.

Объект и методы исследований

Объектом исследований является трещиноватый массив горных пород, в котором производится шарошечное или ударно-вращательное бурение скважин. Для исследований используется метод математического моделирования, основанный на законе сохранения энергии с получением формул для определения скорости бурения, анализом формул, численными расчетами и доказательством правомерности полученных формул.

Результаты исследований

Разрушение трещиноватого массива при шарошечном бурении. При шарошечном бурении разрушение породы происходит в результате микроударов зубков шарошечного долота с определенной скоростью при наличии осевого усилия и крутящего момента [2].

То есть кинетическая энергия (E_k) внедряющихся зубков шарошки, усиленная осевым давлением и крутящим моментом (M), расходуется на упруго-пластические деформации и разрушение горного массива (E_{yn})

$$E_k + M = E_{yn} \quad (3)$$

Кинетическая энергия определяется по известной формуле:

$$E_k = 0,5mv^2, \quad (4)$$

где m — масса внедряющихся зубков, усиленная осевым давлением P_{oc} ; v — скорость внедрения зубков.

Затраты энергии на упруго-пластические деформации горного массива определяются по формуле [19]

$$E_{yn} = \frac{\sigma_c^2(r)}{2E} \Phi V_d, \quad (5)$$

где $\sigma_c(r)$ — сжимающее напряжение в породе; E — модуль упругости породы; Φ — показатель трещиноватости горного массива; V_d — объем зоны деформирования.

В (4) масса и скорость внедрения определены в соответствии с механизмом процесса деформирования и имеют вид:

$$m = P_{oc} a^{-1} = P_{oc} (v_6 n)^{-1}; v = \pi d_d n, \quad (6)$$

где P_{oc} — осевое усилие; a — ускорение при внедрении зубков в породу; v_6 — скорость бурения скважины; n — частота вращения бурового става; d_d — диаметр долота; $\pi = 3,14$.

В (5) объем зоны деформирования можно определить по формуле:

$$V_d = S_c d_e = 0,25 \pi d_d^2 d_e, \quad (7)$$

где S_c — площадь забоя скважины; d_e — размер естественной отдельности.

При определении объема зоны деформирования по (7) учитывалось, что шарошечным долотом деформируется массив на глубину, равную d_e , так как трещины между отдельностями деформируют осевую нагрузку, снижая скорость бурения.

Подставляя (6) в (4), (7) в (5) и результаты в (3), получим зависимость скорости бурения трещиноватого горного массива шарошечным долотом в виде

$$v_6 = \frac{\pi^2 P_{oc} n d_d^2}{2 \left(\frac{\sigma_c^2(r)}{8E} \Phi d_e d_d^2 - M \right)}. \quad (8)$$

Разрушение трещиноватого массива твердосплавными зубками происходит

в основном за счет появления растягивающих напряжений. Тогда величину сжимающих напряжений $\sigma_c(r)$ можно заменить на соотношение

$$\sigma_c(r) = \sigma_p(1 - \nu)\nu^{-1}, \quad (9)$$

где σ_p – предел прочности горной породы на разрыв; ν – коэффициент Пуассона.

Кроме того, необходимо учесть, что формула (8) подразумевает внедрение одного твердосплавного зубка диаметром, равным диаметру скважины. Поэтому в (8) необходимо внести коэффициент концентрации зубков на забой скважины.

$$K_\kappa = \frac{S_3 N_3}{S_c} = \frac{N_3 d_3^2}{d_o^2}, \quad (10)$$

где S_3 – площадь зубка; N_3 – число зубков шарошечного долота, одновременно внедряющихся в забой; S_c – площадь забоя скважины; d_3, d_o – диаметр зубка и диаметр долота соответственно.

Подставляя (10) и (9) в (8), получим:

$$v_6 = \frac{\pi^2 P_{oc} n N_3 d_3^2}{2 \left[\frac{\sigma_p^2}{8E} \left(\frac{1-\nu}{\nu} \right)^2 \Phi d_e \pi d_o^2 - M \right]}, \quad (11)$$

Физико-механические свойства горных пород обладают высокой вариацией, и их довольно сложно определить в производственных условиях. Поэтому в [20] были проведены исследования, по результатам которых установлено, что

$$\frac{\sigma_p^2}{E} \left(\frac{1-\nu}{\nu} \right)^2 = 0,25 f 10^4, \quad (12)$$

где f – коэффициент крепости породы по М.М. Протодьяконову.

Подставив (12) в (11) и сделав численные расчеты, получим формулу для определения скорости бурения в виде:

$$v_6 = \frac{9,86 P_{oc} n N_3 d_3^2}{1963 f d_e \Phi d_o^2 - 2M}, \quad (13)$$

Анализ формулы (11) и (13) показывает, что с увеличением частоты вращения бурового става (n), осевого усилия

(P_{oc}), числа одновременно внедряющихся зубков (N_3), диаметра зубка (d_3) и крутящего момента (M) скорость бурения увеличивается. С увеличением прочности (σ_p) или коэффициента крепости (f) породы, размера отдельности (d_e) и диаметра долота (d_o) скорость бурения (v_6) уменьшается.

В работах [1 – 4, 11] подтверждается изменение скорости бурения в соответствии с приведенными формулами (11), (13), что говорит об их правомерности.

Проведем численные расчеты скорости шарошечного бурения по (13) и сравним их данными практики. Исходные данные для расчетов при бурении станком СБШ-250 МН: $\pi = 3,14$; $n = 1 \text{ с}^{-1}$; $P_{oc} = 150 \cdot 10^3 \text{ Н}$; $M = 2,1 \cdot 10^3 \text{ Н} \cdot \text{м}$; $N_3 = 3$; $d_3^{oc} = 10^{-2} \text{ м}$; $f = 10$; $d_e = 0,5 \text{ м}$; $\Phi = 93,5$; $d_o = 0,25 \text{ м}$. Численные расчеты дают: $v_6 = 0,00835 \text{ м/с}$.

Сравнение численных расчетов с данными практики для станков СБШ-250 МН говорят о завышенной расчетной величине v_6 . В [2] $v_6 = 0,0007 - 0,001 \text{ м/с}$, в [3] $v_6 = 0,008 \text{ м/с}$, в [4] $v_6 = 0,0013 \text{ м/с}$, в [1] $v_6 = 0,0017 - 0,0033 \text{ м/с}$. То есть по фактическим данным величина v_6 составляет $0,0008 - 0,008 \text{ м/с}$ ($0,0044 \text{ м/с}$ в среднем), что в 2 раза меньше расчетной. Вероятно, это связано с тем, что не учтено влияние бурового шлама, наличие которого на забое скважины существенно снижает скорость бурения, кроме того, в расчетах сделаны определенные допущения. С учетом сказанного, формулу можно представить в виде:

$$v_6 = \frac{K P_{oc} n d_3^2}{10^3 f d_e \Phi d_o^2 - M}, \quad (14)$$

где K – коэффициент, устанавливаемый в процессе бурения скважин на карьере.

Показатель буримости (Π_6), характеризующий трудность шарошечного бурения трещиноватого массива горных пород, можно определить из (14) по формуле

$$P_e = f d_e \Phi = K \cdot 10^{-3} \frac{P_{oc} n d_3^2}{v_e d_o^2} + 10^{-3} \frac{M}{d_o^2} \quad (15)$$

Для обоснования правомерности формулы (14) использованы данные справочника [11] при бурении скважин в массивах горных пород с различной категорией буримости при увеличении предела прочности на сжатие $\sigma_{ск}$ от 45 до 300 МПа и f от 3 до 20, $K = 5$.

Данные по категории буримости, $\sigma_{ск}$, f и скорости шарошечного бурения — нормативной (по справочнику [11]) и расчетной — приведены в таблице.

Расчеты по формуле для определения проводились при средних параметрах [11]: $P_{oc} = 150 \cdot 10^3$ Н; $M = 2,1 \cdot 10^3$ Н · м; $d_3 = 0,009$ м; $d_d = 0,25$ м; $d_e = 0,5$ м; $\Phi = 73$; $n = 1$ с⁻¹.

Анализ таблицы указывает на совпадение нормативной и расчетной зависимости скорости шарошечного бурения (при заданных средних параметрах) от коэффициента крепости пород и правомерность полученной зависимости (14). Расхождение наблюдается при $f = 3$, но

в этих породах буровые и взрывные работы как правило не ведутся. Разрушение трещиноватого массива при ударно-вращательном бурении. При ударно-вращательном бурении разрушение породы происходит в основном в результате ударов поршня ударника по хвостовику долота с определенной энергией, частотой ударов и частотой вращения, что приводит к внедрению зубков долота в породу. При этом дополнительно обеспечивается осевое усилие и крутящий момент [1, 2, 4, 21]. То есть кинетическая энергия внедряющихся зубков долота, создаваемая осевым усилием (E_{oc}) и периодически ударами ($E_{уд}$), усиленная крутящим моментом (M), расходуется на упруго-пластические деформации и разрушение трещиноватого горного массива ($E_{ун}$)

$$E_{уд} + E_{oc} + M = E_{ун} \quad (16)$$

Кинетическую энергию, создаваемую осевым усилием, определяют по известной формуле:

$$E_{oc} = 0,5 m v^2, \quad (17)$$

где m — масса внедряющегося бурового става, усиленная осевым давлением P_{oc} ;

Скорость бурения скважин в зависимости от прочности

и коэффициента крепости горных пород (буровой станок СБШ-250 МН)

The speed of drilling wells depending on the strength and rock strength coefficient (SBSH drilling rig-250 MN)

| Категория буримости пород по шкале ЦБНТ | Предел прочности на сжатие $\sigma_{ск}$, МПа | Коэффициент крепости f | Скорость бурения $v_b, 10^{-3}$ м/с | |
|---|--|--------------------------|-------------------------------------|--------------------|
| | | | по справочнику [11] | расчетная, по (14) |
| IX | 45 | 3 | 10 | 13,6 |
| X | 60 | 4 | 8,2 | 9,1 |
| XI | 75 | 5 | 6,7 | 6,9 |
| XII | 90 | 6 | 5,5 | 5,5 |
| XIII | 110 | 7 | 4,6 | 4,6 |
| XIV | 130 | 8 | 3,8 | 3,9 |
| XV | 150 | 10 | 3,2 | 3,1 |
| XVI | 170 | 12 | 2,7 | 2,5 |
| XVII | 200 | 14 | 2,3 | 2,1 |
| XVIII | 230 | 16 | 1,9 | 1,8 |
| XIX | 260 | 18 | 1,6 | 1,7 |
| XX | 300 | 20 | 1,4 | 1,5 |

v — скорость перемещения зубков по окружности.

Кинетическая энергия, создаваемая ударной нагрузкой, равна:

$$E_{\text{уд}} = 0,5m_y v_y^2, \quad (18)$$

где m_y — условная масса поршня ударника; v_y — скорость перемещения зубков долота по окружности.

Затраты энергии на упруго-пластические деформации горного массива определяют по формуле (5). Объем зоны деформирования определяют по формуле (7). Масса и скорость внедрения определены в соответствии с механизмом процесса по формулам (6).

В (18) условную массу и скорость перемещения зубков долота в процессе ударного воздействия можно определить по формулам:

$$m_y = A_{\text{уд}} (v_6 n_1 h_{\text{вн}})^{-1}; v_y = \pi d_{\text{д}} n_1, \quad (19)$$

где $h_{\text{вн}}$ — глубина внедрения зубка в породу.

Подставив (6) в (17) и (19) в (18), а результат и (5) с учетом (7) в (16) и решив уравнение, получим зависимость скорости бурения трещиноватого горного массива при ударно-вращательном бурении по формуле:

$$v_6 = \frac{\pi^2 (P_{\text{ос}} n + A_{\text{уд}} n_1 h_{\text{вн}}^{-1}) d_3^2}{\frac{\sigma_c^2(r)}{4E} \pi \Phi d_e d_3^2 - 2M}. \quad (20)$$

Используя формулы (9), (10), (12) и обоснования к ним, приняв $h_{\text{вн}} = d_3$, сделав численные расчеты, представим формулу для определения скорости ударно-вращательного бурения в виде:

$$v_6 = \frac{5(P_{\text{ос}} n d_3^2 + A_{\text{уд}} n_1 d_3) N_3}{10^3 f d_e \Phi d_3^2 - M}, \quad (21)$$

Анализ формулы (21) показывает, что с увеличением частоты вращения бурового става (n), осевого усилия ($P_{\text{ос}}$), энергии удара ($A_{\text{уд}}$), частоты ударов (n_1), числа одновременно внедряющихся зубков (N_3) диаметра зубка (d_3) и крутящего момента (M) скорость бурения увеличи-

вается. С увеличением прочности или коэффициента крепости (f) породы, размера отдельности (d_e) и диаметра долота ($d_{\text{д}}$) скорость бурения (v_6) уменьшается.

Данный анализ говорит о правомерности полученных формул. Кроме того, в работах [1–4, 11] подтверждается изменение скорости бурения в соответствии с приведенными в формулах (20), (21).

Проведем численные расчеты скорости по (21) и сравним их данными практики. Исходные данные для расчетов при бурении скважин станком СБУ-160 с пневмоударником П-160: $P_{\text{ос}} = 3 \cdot 10^4$ Н; $n = 1$ с⁻¹; $d_3 = 8 \cdot 10^{-3}$ м; $A_{\text{уд}}^{\text{ос}} = 314$ Дж; $n_1 = 21$ с⁻¹; $N_3 = 3$; $f^{\text{уд}} = 10$; $d_e = 0,5$ м; $\Phi = 93$; $d_{\text{д}} = 0,16$ м; $M = 2,4 \cdot 10^3$ Н·м. Численные расчеты по (21) дают: $v_6 = 0,078$ м/с.

В среднем фактическая величина v_6 составляет при бурении скважин диаметром 160 мм станком Урал-64 0,0014–0,002 м/с [10], станками «Атлас Копко» с пневмоударниками 0,0058–0,0083 м/с, с гидроударниками 0,017–0,025 м/с [4].

Расчетная скорость бурения примерно в 5–10 раз превышает фактическую. Вероятно, при расчетах скорости бурения не учтено влияние наличия бурового шлама на забое скважины из-за его несвоевременного удаления. При использовании погружных пневмоударников, например фирмы «Атлас Копко» [11], частота ударов составляет 35–48 с⁻¹, энергия ударов 140 Дж (для пневмоударников), 450 Дж (для гидроударников). Число ударов по забою за один оборот составляет 29–40 при частоте вращения 1,2 с⁻¹. Осевая нагрузка на забой — 30 кН. Превышение указанных параметров сопровождается снижением скорости бурения по причине несвоевременного удаления шлама из скважины. Помимо этого, коэффициент полезного действия при бурении согласно [4] составляет менее 0,6. С учетом приведенного анализа (21) можно переписать в виде:

$$v_6 = \frac{K(P_{oc}nd_3^2 + A_{y0}n_1d_3)}{10^3 fd_e \Phi d_0^2 - M}, \quad (22)$$

где K — коэффициент, устанавливаемый в процессе ударно-вращательного бурения скважин на карьере.

Показатель буримости (Π_6) определен из (22) и имеет вид:

$$\Pi_6 = fd_e \Phi = \frac{K(P_{oc}nd_3^2 + A_{y0}n_1d_3)}{10^3 v_6 d_0^2} + 10^{-3} \frac{M}{d_0^2}. \quad (23)$$

Для установления коэффициента K в формуле (22) и доказательства ее достоверности необходимо провести исследования по определению скорости ударно-вращательного бурения на карьерах с фиксированием всех параметров в этих формулах и математической обработкой данных.

Заключение

Таким образом, математическое моделирование с использованием закона сохранения энергии позволило установить формулы расчета скорости шарошечного и ударно-вращательного бурения в трещиноватом массиве горных пород. Математические зависимости, связывающие скорость бурения, режимы бурения, параметры долота и показатель буримости трещиноватых горных пород, позволят (при использовании системы автоматизированного учета «Wenco») нормировать процесс бурения и корректировать параметры взрывных работ.

Выводы и направления дальнейших исследований

На основе закона сохранения энергии получены формулы для определения

скорости шарошечного и ударно-вращательного бурения в трещиноватом массиве горных пород и показателя буримости массива.

Формулы для определения скорости шарошечного и ударно-вращательного бурения, а также показателя буримости Π_6 учитывают параметры долота (диаметр долота и зубков, число зубков), режимы бурения (осевое усилие, крутящий момент, частота вращения и ударов, энергия удара), коэффициент крепости (прочность) горных пород и параметры трещиноватости массива (размер отдельности, показатель трещиноватости).

Доказана правомерность полученных зависимостей для определения скорости шарошечного и ударно-вращательного бурения путем их математического анализа и численных расчетов.

При ударно-вращательном бурении превышение предельных параметров взаимодействия долота с породой: частоты ударов за один оборот вращения, энергии удара и осевой нагрузки может привести к снижению скорости бурения из-за зашламовывания скважины.

Достоверность формул по определению скорости шарошечного и ударно-вращательного бурения может быть установлена путем проведения исследований на карьерах с фиксированием всех параметров (например, при использовании системы автоматизированного учета «Wenco») и математической обработке данных.

Установление показателя буримости при шарошечном и ударно-вращательном бурении в автоматическом режиме позволит нормировать процесс бурения и корректировать параметры БВР.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кутузов Б. Н. Взрывное и механическое разрушение горных пород. — М.: Недра, 1973. — 311 с.
2. Мосинец В. Н., Пашков А. Д., Латышев В. А. Разрушение горных пород. — М.: Недра, 1975. — 216 с.

3. Тангаев И. А. Энергоемкость процессов добычи и переработки полезных ископаемых. — М.: Недра, 1986. — 231 с.
4. Крюков Г. М. Физика разрушения горных пород при бурении и взрывании. Т. 1. — М.: Изд-во «Горная книга», 2006. — 330 с.
5. Репин Н. Я., Богатырев В. П., Буткин В. Д., Бирюков А. В. и др. Буровзрывные работы на угольных разрезах. — М.: Недра, 1987. — 254 с.
6. Синев С. В. Модели бурения in situ // Территория Нефтегаз. — 2016. — № 11. — С. 41–49.
7. Шигин А. О., Шигина А. А., Бовин К. А. Повышение производительности станков шарошечного бурения при своевременном регулировании режимных параметров // Вестник Иркутского государственного технического университета. — 2015. — № 8. — С. 65–72.
8. Каледин О. С. Инновационные технологии строительства сверхглубоких шахтных стволов // Горный журнал. — 2014. — № 4. — С. 77–81.
9. Синев С. В. Механизмы, методы и способы разрушения горных пород в шарошечном бурении // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2016. — № 1. — С. 149–159.
10. Миндели Э. О. Разрушение горных пород. — М.: Недра, 1975. — 600 с.
11. Трубецкой К. Н., Потапов М. Г., Виницкий К. Е., Мельников Н. Н. и др. Справочник. Открытые горные работы. — М.: Горное бюро, 1994. — 590 с.
12. Синев С. В. Буримость горных пород и выбор наиболее эффективного бурового инструмента // Горный журнал. — 2018. — № 12. — С. 59–64. DOI: 10.17580/gzh.2018.12.12.
13. Sapik M., Yilmaz A. O., Yasar S. Relationships between the drilling rate index and physico-mechanical rock properties // Bulletin of Engineering Geology and the Environment. 2017. Vol. 76. No 1. Pp. 253–261.
14. Zhabin A., Polyakov A., Averin E. Scale factors for conversion of forces on disc cutters for the main domestic and foreign methods // Mining of Mineral Deposits. 2017. Vol. 11. No 3. Pp. 50–55.
15. Beshenkov P. S., Polushin N. I., Gkhorbani S., Sorokin E. N. Stress distribution analysis of PDC drill bits by computer modeling // Eurasian Mining. 2017. No 2. Pp. 25–28. DOI: 10.17580/em.2017.02.06.
16. Rakishev B. R., Shashenko A. N., Kovrov A. S. Trends of the rock failure conceptions development // News of the national academy of sciences of the republic of Kazakhstan. Series of geology and technical sciences. 2018. Vol. 5. No 431. Pp. 161–169. DOI: 10.32014/2018.2518-170X.46.
17. Eremenko V. A., Neguritsa D. L. Efficient and active monitoring of stresses and strains in rock masses // Eurasian Mining. 2016. No 1. Pp. 21–24. DOI: 10.17580/em.2016.01.02.
18. Крылов И. О., Валавин В. С. Эффекты ультразвуковой обработки лежалых хвостов Камыш-Бурунского железорудного комбината (Республика Крым) // Экология и промышленность России. — 2018. — Т. 22. — № 2. — С. 13–19.
19. Тюпин В. Н. Взрывные и геомеханические процессы в трещиноватых напряженных горных массивах. — Белгород: ИД «Белгород» НИУ «БелГУ», 2017. — 192 с.
20. Кутузов Б. Н., Тюпин В. Н. Упрощенный расчет параметров массового взрыва на карьерах // Известия вузов. Горный журнал. — 1985. — № 7. — С. 66–67.
21. Кутузов Б. Н. Разрушение горных пород взрывом. — М.: изд-во МГИ, 1992. — 516 с. **ГИАБ**

REFERENCES

1. Kutuzov B. N. *Vzryvnoe i mekhanicheskoe razrushenie gornykh porod* [Explosive and mechanical destruction of rocks], Moscow, Nedra, 1973, 311 p.
2. Mosinec V. N., Pashkov A. D., Latyshev V. A. *Razrushenie gornykh porod* [The destruction of rocks], Moscow, Nedra, 1975, 216 p.
3. Tangaeв I. A. *Energoemkost' protsessov dobychi i pererabotki poleznykh iskopaemykh* [Energy intensity of mining and mineral processing], Moscow, Nedra, 1986, 231 p.

4. Kryukov G.M. *Fizika razrusheniya gornyykh porod pri burenii i vzryvanii*. T. 1 [Physics of rock destruction during drilling and blasting. Vol. 1], Moscow, Izd-vo «Gornaya kniga», 2006, 330 p.
5. Repin N.Ya., Bogatyrev V.P., Butkin V.D., Biryukov A.V. *Burovzryvnye raboty na ugol'nykh razrezakh* [Drilling and blasting in coal mines], Moscow, Nedra, 1987, 254 p.
6. Sinev S. V. In situ drilling models. *Territoriya Neftegaz*. 2016, no 11, pp. 41 – 49.
7. Shigin A. O., Shigina A. A., Bovin K. A. Increasing the productivity of cone drilling machines with timely regulation of operating parameters. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2015, no 8, pp. 65 – 72.
8. Kaledin O. S. Innovative technologies for the construction of ultra-deep mine shafts. *Gornyy Zhurnal*. 2014, no 4, pp. 77 – 81.
9. Sinev S. V. Mechanisms, methods and methods of rock destruction in cone drilling. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2016, no 1, pp. 149 – 159.
10. Mindeli E. O. *Razrushenie gornyykh porod* [The destruction of rocks], Moscow, Nedra, 1975, 600 p.
11. Trubetskoy K. N., Potapov M. G., Vinitskiy K. E., Mel'nikov N. N. *Spravochnik. Otkrytye gornyye raboty* [Reference. Open cast mining], Moscow, Gornoe byuro, 1994, 590 p.
12. Sinev S. V. Drillability of rocks and the choice of the most effective drilling tool. *Gornyy Zhurnal*. 2018, no 12, pp. 59 – 64. DOI: 10.17580/gzh.2018.12.12.
13. Capik M., Yilmaz A. O., Yasar S. Relationships between the drilling rate index and physico-mechanical rock properties. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. 2017. Vol. 76. No 1. Pp. 253 – 261.
14. Zhabin A., Polyakov A., Averin E. Scale factors for conversion of forces on disc cutters for the main domestic and foreign methods. *Mining of Mineral Deposits*. 2017. Vol. 11. No 3. Pp. 50 – 55.
15. Beshenkov P. S., Polushin N. I., Gkhorbani S., Sorokin E. N. Stress distribution analysis of PDC drill bits by computer modeling. *Eurasian Mining*. 2017. No 2. Pp. 25 – 28. DOI: 10.17580/em.2017.02.06.
16. Rakishev B. R., Shashenko A. N., Kovrov A. S. Trends of the rock failure conceptions development. *News of the national academy of sciences of the republic of Kazakhstan. Series of geology and technical sciences*. 2018. Vol. 5. No 431. Pp. 161 – 169. DOI: 10.32014/2018.2518-170X.46.
17. Eremenko V. A., Neguritsa D. L. Efficient and active monitoring of stresses and strains in rock masses. *Eurasian Mining*. 2016. No 1. Pp. 21 – 24. DOI: 10.17580/em.2016.01.02.
18. Krylov I. O., Valavin V. S. Effects of ultrasonic treatment of old tailings at the Kamyshturun Iron Ore Plant. *Ecology and Industry of Russia*. 2018. Vol. 22. No 2. Pp. 13 – 19.
19. Tyupin V. N. *Vzryvnye i geomekhanicheskie protsessy v treshchinovatykh napryazhennykh gornyykh massivakh* [Explosive and geomechanical processes in fractured stressed mountain ranges], Belgorod, ID «Belgorod» NIU «BelGU», 2017, 192 p.
20. Kutuzov B. N., Tyupin V. N. A simplified calculation of the parameters of a mass explosion in quarries. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Gornyy zhurnal*. 1985, no 7, pp. 66 – 67.
21. Kutuzov B. N. *Razrushenie gornyykh porod vzryvom* [Rock destruction by explosion], Moscow, izd-vo MGI, 1992, 516 p. [In Russ].

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Тюпин Владимир Николаевич – д-р техн. наук, профессор, e-mail: tyupinvn@mail.ru, Белгородский государственный национальный исследовательский университет.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

V.N. Tyupin, Dr. Sci. (Eng.), Professor, e-mail: tyupinvn@mail.ru, Belgorod State National Research University, 308015, Belgorod, Russia.

Получена редакцией 18.02.2020; получена после рецензии 11.03.2020; принята к печати 20.05.2020.
Received by the editors 18.02.2020; received after the review 11.03.2020; accepted for printing 20.05.2020.