

ГОРНОЕ МАШИНОВЕДЕНИЕ

УДК 622.243; 622.24.08; 550.8.053

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАЦИОНАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ УДАРНО-ВРАЩАТЕЛЬНОГО БУРЕНИЯ СКВАЖИН В ПРОЧНЫХ ГОРНЫХ ПОРОДАХ

В. Н. Карпов, А. М. Петреев

*Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН,
E-mail: karpov@misd.ru, Красный проспект, 54, 630091, г. Новосибирск, Россия*

Рассмотрена проблема определения рациональных режимов ударно-вращательного бурения скважин погружным пневмоударником и приведены критерии оценки их диапазона, обеспечивающие проходку скважины с минимальной энергоемкостью и износом инденторов. Представлены расчетные формулы режимов бурения и доказано, что целесообразно использовать максимальный объем разрушенной породы при минимальном количестве ударных воздействий на забой скважины за один полный оборот долота. Установлен верхний предел угла поворота долота пневмоударника между ударными нагрузками, обеспечивающий максимальную производительность бурения с минимальной энергоемкостью разрушения и износом твердосплавных инденторов. Оптимальный режим ударно-вращательного бурения для различных моделей пневмоударников следует определять по энергетическому критерию объемного разрушения горных пород, а также энергоемкости их разрушения.

Ударно-вращательное бурение, рациональные режимы бурения, буровое долото, износ инденторов, критерий объемного разрушения горных пород, энергоэффективность, производительность

DOI: 10.15372/FTPRPI20210310

С целью повышения интенсификации бурения скважин исследователи разных стран ведут поиск оптимальных условий разрушения прочных горных пород [1 – 5]. Подходы к интенсификации буровых процессов различны и в техническом аспекте заключаются как в разработке энергонасыщенных ударных систем, так и в создании породоразрушающего инструмента, адаптированного к условиям породного массива с различными физико-механическими свойствами [6 – 12]. Задачи современного бурения скважин ориентированы на снижение энергоемкости проходки скважин, повышение прочности породоразрушающего инструмента и увеличение производительности буровых работ [13 – 15].

При ударно-вращательном способе бурения скважин поиск энергоэффективного режима бурения зависит от правильного определения забойной мощности ударной машины (суммарной мощности ударов при одном обороте бурового става), которая достигается рациональным сочетанием энергии и частоты ударных воздействий в процессе проходки скважины. Применительно к любой ударной системе необходима адаптация ее параметров и режимов бурения к конкретным физико-механическим свойствам и напряженно-деформированному состоянию

горных пород. Мониторинг и коррекция режимов бурения скважин должны осуществляться непрерывно, от этого зависят интенсивность износа твердосплавных инденторов породоразрушающего инструмента, механическая и рейсовая скорости проходки скважин, производительность и себестоимость прямых затрат на 1 п. м [16].

Анализ практики опытно-промышленных испытаний буровых машин и породоразрушающего инструмента, а также технологий бурения, проводимых ИГД СО РАН, выявил недостаточно высокий и нестабильный уровень производительности буровых работ на горных предприятиях страны [17, 18]. Так, при ударно-вращательном бурении глубоких дегазационных скважин с поверхности проходка на буровое долото пневмоударника одного типоразмера и модели по квазиоднородным породам прочностью до 100 МПа может варьировать от 100 до 1200 п. м буримых скважин. На рис. 1 показано долото пневмоударника, преждевременно вышедшего из строя по причине полного износа твердосплавных инденторов периферии бурового долота. При этом бурение велось на современной буровой установке Prakla RB-50, предусматривающей широкую возможность по выбору режимов бурения. Дополнительно на буровом участке имелся геологический разрез, который позволяет своевременно вносить корректировки в режим бурения скважины при вхождении в пласт горной породы [19].



Рис. 1. Отработанное долото пневмоударника после бурения скважины на горном отводе шахты “Полысаевская”.

Следовательно, определение текущих энергоэффективных и высокопроизводительных режимов бурения, обеспечивающих минимальный износ породоразрушающих элементов бурового инструмента, является важной задачей. С ростом глубины бурения скважин необходимость ее решения только возрастает [20–22].

СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

За рубежом более ранний переход погружных ударных систем на давление сжатого воздуха свыше 2 МПа позволил осуществлять объемное разрушение горных пород при бурении. Такой переход способствовал увеличению динамических нагрузок на инденторы буровых долот до номинальных показателей и их адаптации к свойствам горных пород по форме и размерам [23, 24]. Это расширило диапазон выбора параметров режимов бурения по частоте вращения и усилию подачи. Зарубежная практика эксплуатации пневмоударников высокого давления позволила разработать как общие рекомендации по выбору режимов разрушения для различных типоразмеров пневмоударников, так и более частные, относящиеся к конкретным моделям машин [25, 26]. Ниже представлены технические характеристики, полученные при бурении взрывных скважин диаметром 171.4 мм буровым станком DM45HP, оснащенным пневмоударником 6-3/4 QL65Q (Швеция), по породам с прочностью 203 МПа [18]:

Давление воздуха, МПа	2.4	2.3	2.2	2.1	2.0
Расход воздуха, м ³ /мин	27.3	25.8	24.4	23.0	21.6
Скорость бурения, м/ч	46.0	44.3	42.7	41.1	39.3
Частота ударов, уд/мин	1876	1844	1813	1783	1751
Скорость вращения, об/мин	40	39	37	36	34
Усилие подачи, кгс	1308	1262	1222	1181	1137
Скорость продувки, м/мин	2626	2482	2341	2212	2086
Срок службы пневмоударника, м	9853	11029	12400	13852	15769
Срок службы долота, м	1793	1726	1664	1601	1532

Как следует из приведенных данных, с повышением давления воздуха и увеличением мощностных характеристик базовой машины появилась возможность увеличивать частоту вращения и угол между ударными воздействиями инденторов долота.

В настоящее время угол между ударными нагрузками в зависимости от типоразмера моделей пневмоударников и механических свойств породного массива варьирует от 10 до 25°. Предельное число оборотов для ударно-вращательного бурения на высоком давлении энергоносителя в условиях породных массивов с низкими показателями прочности руд и пород (до 80 МПа) при проходке скважин диаметром до 110 мм не превышает 90 об/мин [26–29].

За рубежом важное значение уделяется оценке прочности твердосплавных инденторов буровых долот, интенсивность износа которых зависит от выбора режима бурения. При чрезмерном износе инденторов бурового долота снижается механическая скорость бурения, происходит рост наработки ответственных узлов и агрегатов буровых машин, перерасход потребляемых энергоносителей, что ведет к снижению производительности и росту себестоимости затрат на проведение буровых работ (табл. 1) [25, 30].

ТАБЛИЦА 1. Влияние износа инденторов буровых коронок гидроперфораторов на технико-экономические показатели бурения

Твердосплавные инденторы	А	В	С
Износ инденторов, %	30	50	70
Штыревая коронка			
Срок службы, п. м	600	450	120
Стоимость, €		100	
Себестоимость, €/п. м	0.16	0.22	0.83
Хвостовик			
Срок службы, п. м	6000	5100	4488
Стоимость, €		200	
Себестоимость, €/п. м	0.033	0.039	0.045
Буровая штанга			
Срок службы, п. м	3500	5100	4488
Стоимость, €		600	
Себестоимость, €/п. м	0.17	0.20	0.23
Скорость бурения, %	100	85	70
Выработка, п. м/год	246000	209100	172200
Общая себестоимость прямых затрат, €/п. м	0.363	0.459	1.105

На рис. 2 показаны детали гидроперфоратора, подверженные преждевременному разрушению при отсутствии своевременной заточки инструмента. Выносные гидроперфораторы, как и пневмоударники, относятся к ударно-вращательному способу бурения шпуров и скважин.

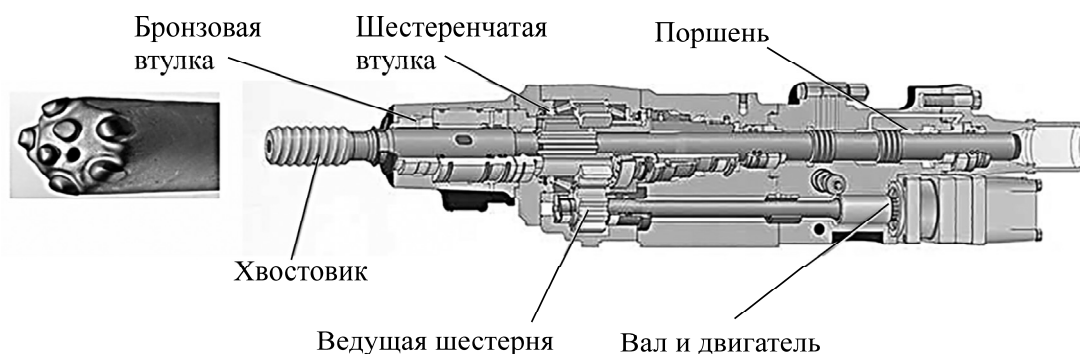


Рис. 2. Детали гидроперфоратора, подверженные преждевременному износу при отсутствии заточки инденторов буровых коронок

Обширный перечень зарубежных рекомендаций (указаний) по ведению буровых работ пневматическими и гидравлическими ударными системами носит весьма общий характер [25]. Это обусловлено тем, что на производственных площадках физико-механические свойства горных пород изменяются в очень широком диапазоне, что требует непрерывных мероприятий по адаптации бурового инструмента и режимов бурения к изменяющимся условиям породного массива [16, 25]. В мировой практике развития ударно-вращательного бурения скважин большое значение имеет подготовка высококвалифицированных специалистов. В России при обучении операторов буровых установок ROC L8 и других современных аналогов особое внимание уделяется разъяснению механизма разрушения пород при ударном воздействии. При изучении учебного материала приводится классическая схема динамического разрушения горной породы по Хартману (рис. 3) [31]. Это важно, так как часть операторов буровых установок ранее выполняла буровые работы исключительно на установках шарошечного бурения, где ключевыми параметрами, влияющими на повышение механической скорости бурения, служили осевые усилия и частота вращения бурового става, в 2–5 раз большие, чем при пневмоударном бурении скважин [32]. Однако в отношении бурения шарошечными долотами существуют разные мнения. Многие исследователи относят его к ударному бурению [25, 33]. Зубья шарошек долота, перекатываясь по забою скважины, оказывают воздействие, воспринимаемое как ударное разрушение на породу. Тем не менее с позиции энергетической теории разрушения, вытекающей из известных теорий механического разрушения горных пород, шарошечное бурение относится к вращательному способу бурения скважин. Согласно этой теории, для разрушения горных пород предпочтительным является такой режим его существования, когда обеспечивается минимум энергоемкости [24, 34].

На рис. 3 представлена схема ударного разрушения забоя скважины при ударно-вращательном бурении. Чрезмерное увеличение частоты вращения $f_{вр}$ ведет к увеличению забойной площади разрушения на каждый индентор долота из-за увеличения угла поворота между динамическими воздействиями γ , что вызывает их преждевременный износ. При увеличении усилия подачи N между ударами происходит резание породы, что также ускоряет процесс разрушения твердосплавных инденторов. При нерациональном выборе $f_{вр}$ и N в процессе проходки скважины усиливается эффект износа твердосплавных инденторов бурового долота пневмоударника. Поэтому выбору режимов разрушения горных пород при пневмоударном бурении скважин уделяется повышенное внимание, особенно частоте вращения $f_{вр}$ при проходке скважин увеличенного диаметра [25, 35].

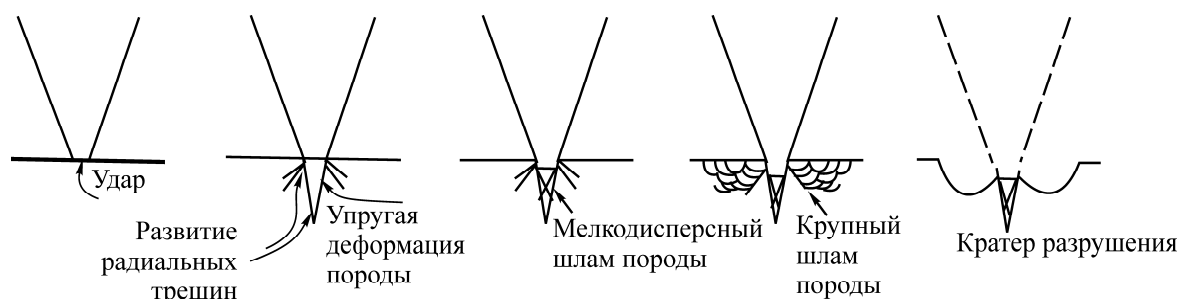


Рис. 3. Схема образования кратера разрушения при динамическом внедрении индентора в породу [31]

Рассмотрим способы выбора рациональных режимов бурения погружным пневмударником серии QL60 при проходки скважин на станках серии ROC при давлении сжатого воздуха 2.4 МПа [35]. При вращении бурового става помощник машиниста буровой установки визуально регистрирует шаг его погружения за один оборот вращения става и управляет им путем изменения частоты вращения [36]. Оптимальным считается шаг погружения 9.5–15.8 мм. При толщине слоя отбитой породы за один оборот свыше 15.8 мм предлагается увеличивать частоту вращения, а при 9.5 мм и меньше — снижать. При этом в рекомендациях не указано, каких именно значений диапазона следует придерживаться при бурении в породах с различными прочностными свойствами.

Дальнейшие рекомендации по выбору режима бурения пневмударником QL60 заключаются в определении рациональной частоты вращения по форме износа твердосплавных инденторов. Косой износ передней кромки инденторов (на стороне в направлении вращения) свидетельствует о низкой частоте вращения става, косой износ задней кромки инденторов — о высокой частоте. При рациональной частоте вращения става износ приходится на вершину вставок (параллельно забою). Указанные способы определения рациональных режимов бурения носят эмпирический характер и во многом зависят от квалификации бурового мастера.

Как показывает практика отечественной эксплуатации зарубежных буровых станков пневмударного бурения, оснащенных импортными моделями погружных машин и инструментов, производительность бурения в большей степени зависит не от применения общих рекомендаций компаний-производителей оборудования, а от результатов производственных испытаний буровых комплектов в конкретных горно-геологических и горнотехнических условиях месторождения полезных ископаемых.

В настоящей работе для определения и изучения критериев оценки рациональных режимов ударно-вращательного бурения погружным пневмударником, обеспечивающим проходку скважин с минимальной энергоемкостью и износом инденторов, проведены комплексные исследования. Они заключаются в адаптации энергетического критерия объемного разрушения горных пород В. Н. Опарина к определению рационального режима бурения, но с учетом технико-технологических условий реализации этого процесса в натурных условиях [16, 22].

СПОСОБЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАЦИОНАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ БУРЕНИЯ СКВАЖИН

Важным условием эффективного проведения промышленных испытаний буровой техники, а также технического нормирования является определение рациональных режимов бурения на месте ведения буровых работ. При этом адаптация режимов бурения к конкретным горно-геологическим условиям породного массива требуется каждому образцу погружной или выносной ударной системы как в начале рабочей смены, так и в процессе ведения буровых работ.

У бурового долота при пневмоударном бурении скважины существует рациональный угол поворота γ_r между ударными воздействиями инденторов, зависящий от схемы расстановки в матрице долота [37–39], механических свойств породного массива и мощностных параметров ударной машины [40–42]. При выборе рационального режима бурения он обеспечивает механическое разрушение максимального объема породы с минимальной энергоемкостью (рис. 4а) [30].

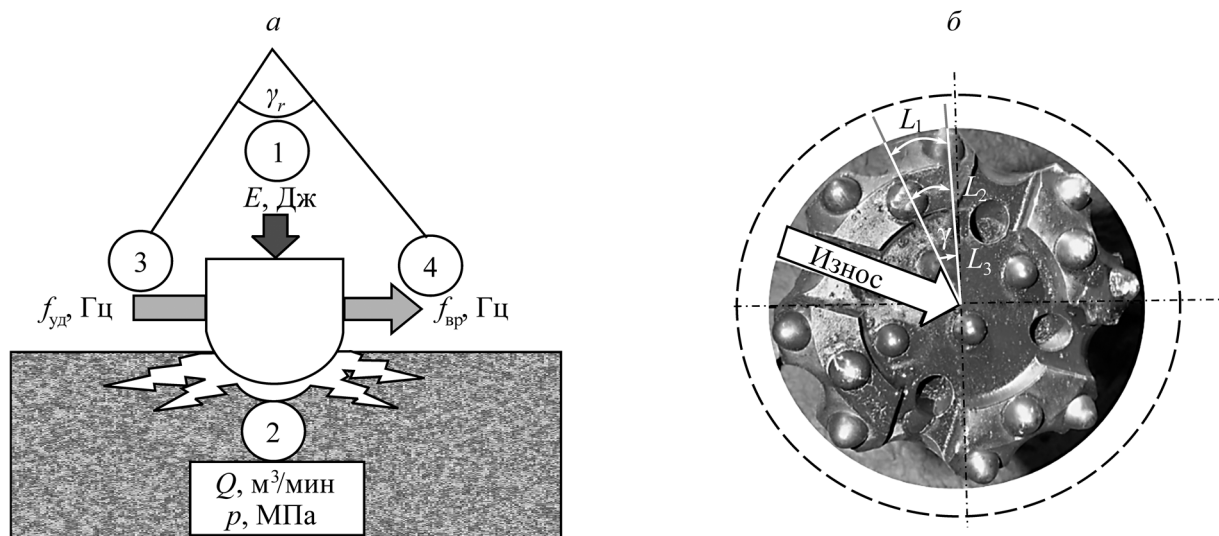


Рис. 4. Выбор рационального угла γ_r между ударными нагрузками: а — схема параметров, влияющих на выбор угла; б — L_1, L_2, L_3 — путь износа инденторов при установленном угле γ

Из рис. 4а видно, что параметр 1 определяет глубину и площадь кратера разрушения 2, а с учетом параметра 3 — выбор параметра 4, который устанавливает угол γ_r , от которого в процессе пневмоударного бурения зависит ударная мощность на забое скважины за один полный оборот долота $W_{2\pi}$ и интенсивность износа инденторов бурового долота (рис. 4б) [30].

Для полного разрушения породы на забойной площадке скважины каждый индентор должен нанести определенное количество ударных воздействий и отбить необходимый объем породы, зависящий от радиуса его размещения в матрице долота. Наибольшее количество ударных воздействий требуют периферийные забойные площади скважины. При выборе рационального режима бурения по прочным породам следует добиваться условий их полного разрушения за один оборот става, но с максимальной скоростью бурения и при минимальном износе инденторов периферии, поскольку на них приходится максимальный путь между ударными нагрузками (рис. 5б) [30].

Необходимо найти рациональный угол между ударными воздействиями (рис. 5в), поскольку при низкой частоте вращения (рис. 5а) разрушение происходит с высокой энергоемкостью и низкой механической скоростью бурения. Это вызывает переизмельчение породы и косой износ фронтальных инденторов в сторону вращения бурового става [30, 35]. При высокой частоте вращения бурового става (рис. 5б) сокращается число ударных воздействий на забой скважины за один оборот, что ведет к оставлению недостаточно разрушенных площадей забоя скважины на следующий оборот. Происходит увеличение пути холостого вращательного износа между ударами от центра к периферии; на фронтальных инденторах возникает косой износ с противоположной вращению става стороны. Инденторы периферийного ряда нередко выпадают раньше, чем механически изнашиваются из-за “выедания” тела матрицы, что приводит к аварийным ситуациям. Механическая скорость бурения при этом высокая, но длина проходки скважины на одно долото низкая. Это ведет к увеличению количества рейсов при проходке глубоких взрывных скважин, а следовательно, перерасходу энергоносителей и снижению производительности буровых работ [18, 37].

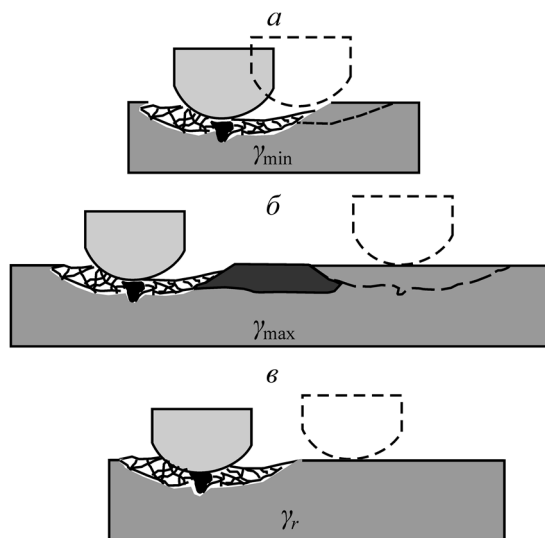


Рис. 5. Характер разрушения горных пород при изменении угла γ : a — минимальное значение; $б$ — максимальное значение; $в$ — рациональное значение

На рис. 6 показана хронология объемного и усталостного разрушения горной породы при динамическом воздействии от индентора бурового долота при усилии подачи, компенсирующей реакцию отдачи пневмоударника от забоя скважины. Увеличение площади и глубины разрушения кратера (рис. 6а) является важным условием увеличения угла γ_r . При их уменьшении (рис. 6б) значение угла γ_r необходимо снижать.

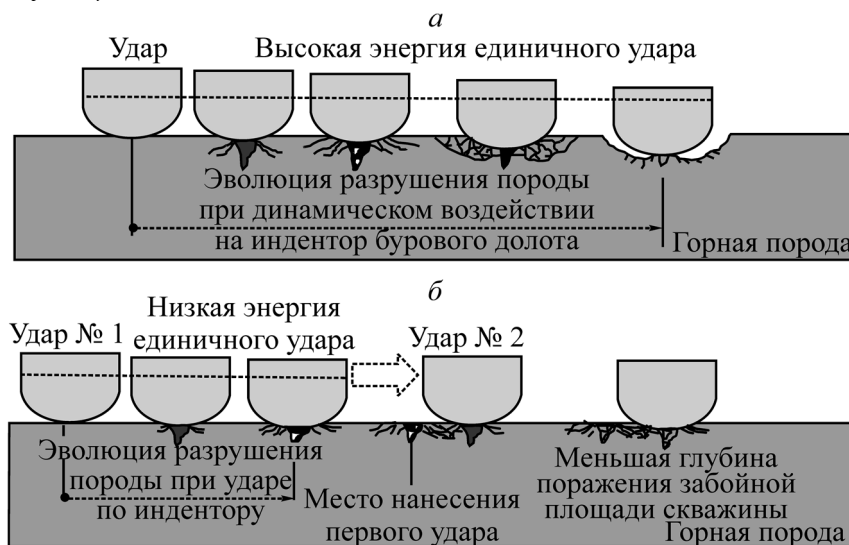


Рис. 6. Хронология динамического разрушения: a — объемное; $б$ — усталостное

При бурении с изношенными инденторами отмечается малоэффективное поверхностное разрушение породы, при котором перемещение буровой колонны происходит после многократного динамического воздействия на забой скважины. Так, при ударно-вращательном бурении скважины работающий пневмоударник совершает несколько вращательных циклов на одном месте, образуя неглубокие сетки трещин на забое скважины, размеры которых не обеспечивают отделения кусков породы от массива за один полный оборот става (рис. 6б). Увеличение частоты вращения става при постоянном усилии подачи (рис. 5б) снижает динамическую нагрузку на забой скважины и повышает интенсивность износа твердого сплава, что ведет к его разрушению. При

чрезмерном усилии подачи происходит наложение эффектов износа и разрушение инденторов долота от периферии к центру. Увеличенная площадь изношенных инденторов также приводит к увеличению сил трения о породу при их взаимодействии и чрезмерному увеличению температуры породоразрушающих элементов и матрицы долота в целом.

Бурение в режиме усталостного разрушения происходит при низкой энергии единичного удара погружных машин, которые не обеспечивают номинальных динамических нагрузок на инденторы долот, а также при чрезмерном количестве инденторов в матрице буровых долот. На рис. 7а приведен пример разрушенной коронки гидроперфоратора, износ которой вызван неправильным выбором режима бурения по частоте вращения в горной породе прочностью 150 МПа [22]. На рис. 7б показаны отработанные буровые коронки с рациональным режимом бурения и выполнением заточных мероприятий в период эксплуатации.

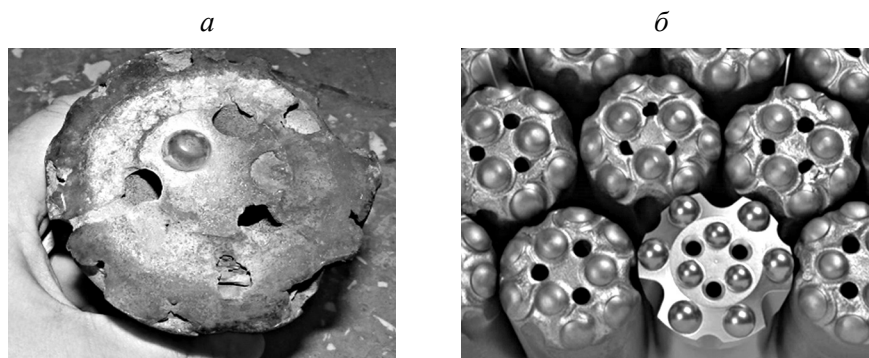


Рис. 7. Износ буровых коронок гидроперфоратора при нерациональном (а) и рациональном (б) режимах бурения

Износ инденторов буровых долот ведет к снижению энергетического воздействия на забой скважины и снижению механической скорости бурения (см. табл. 1). За рубежом порог максимального снижения средневзвешенного показателя механической скорости бурения в течение рабочей смены определен 15 % [43], его превышение предполагает устранение причин спада производительности (проверку режима бурения, инденторов долота, пневмоударника и др.). В России этот показатель нередко превышает 50 % из-за отсутствия точных данных о физико-механических свойствах горных пород, а также рекомендаций по определению и выбору установочных режимов бурения с учетом мощностных параметров пневмоударников и вооружения буровых долот; по заточке и замене буровых долот с учетом применяемых систем разработки; по определению и выбору рационального использования очистных агентов (вода, пена) в процессе бурения.

Известно [30, 38], что при постоянном давлении энергоносителя и усилии подачи механическая скорость бурения погружными пневмоударниками практически не меняется в широком диапазоне углов γ , при его увеличении происходит преждевременный износ инденторов буровых долот. Причины этого изучены недостаточно глубоко, поскольку общепринятого способа для выбора режимов бурения к различным горным породам нет, а существующие имеют эмпирический характер [25, 26]. Результаты проведенных исследований показали необходимость введения оценочного критерия для определения рациональных режимов бурения, отличного от общепринятого – механической скорости бурения.

Известная формула ударной мощности [34]:

$$W = Ef_{\text{уд}},$$

где E — энергия единичного удара, а $f_{\text{уд}}$ — частота ударных воздействий машины, является характеристикой только ударной системы.

Для учета частоты вращения става (при установленном усилии подачи и частоте ударов) [24] введена забойная мощность пневмоударника:

$$W_{2\pi} = Es = \frac{Et_{2\pi}}{t_{\text{ц}}},$$

где E — энергия единичного удара пневмоударника, Дж; $s = f_{\text{уд}} t_{2\pi}$ — количество ударных воздействий за оборот долота, уд/об; $t_{2\pi}$ — время полного оборота става, с; $t_{\text{ц}} = 1/f_{\text{уд}}$ — продолжительность ударного цикла, с.

В табл. 2 приведены результаты натурных экспериментов по изучению влияния режимов бурения на энергоэффективность проходки взрывных скважин с учетом интенсивности износа инденторов буровых долот [22]. Эксперименты проводились в шахте им. Губкина при проходке скважин по слабобрудным кварцитам ($\sigma_{\text{сж}} = 190$ МПа [16]). Бурение выполнялось пневмоударником П-105ПМ на двух станках: НКР100МА с неуправляемой частотой вращения 79 об/мин и на станке НКР100МПА с управляемой частотой вращения 30 и 38 об/мин. К общим данным применяемых

в расчетах параметров и показателей энергоэффективности бурения относятся: энергия единичного пневмоударника $E = 118$ Дж при давлении сжатого воздуха 0.6 МПа, длина контрольного отрезка измерений $L = 1.2$ м, диаметр долота $D = 0.105$ м, забойная площадь разрушения $s_{\text{заб}} = 0.0086$ м², общий объем разрушенной породы на контрольном участке $V_U = 0.01032$ м³, усиление подачи $N = 2.8$ кН.

Установлено, что в качестве критерия оценки рационального режима бурения погружными пневмоударниками целесообразно использовать максимальный объем разрушенной породы при минимальном количестве ударных воздействий на забой скважины s за один полный оборот долота, определяющий верхний предел рационального угла поворота между ударными нагрузками γ_r и обеспечивающий максимальную производительность. Превышение этого предела путем увеличения частоты вращения става ведет к снижению объемов разрушенной породы за оборот и преждевременному износу твердого сплава инденторов, а уменьшение — к потере механической скорости бурения.

Результаты экспериментов показали, что определение рациональных режимов бурения погружными пневмоударниками может осуществляться по безразмерному энергетическому критерию объемного разрушения горных пород k . В качестве подтверждения рассмотрим диаграмму изменения показателей k , s , $h_{2\pi}$ на участке L в зависимости от частоты вращения става $f_{\text{вр}}$ (рис. 8). Минимальные значения показателей k обеспечивают энергоэффективное бурение.

Рациональный угол между ударными нагрузками γ_r при бурении по слабобрудным кварцитам пневмоударником П-105ПМ с минимальной энергоемкостью разрушения при $k = (4.75 - 4.32) \cdot 10^{-9}$ достигается в диапазоне частот вращения става 0.57–0.63 Гц (34–38 об/мин) и составляет 9.6–10.6° [30].

Интенсивность поражения забоя при изменениях забойной мощности погружного пневмоударника за счет частоты вращения става схематично отображена на рис. 9. Угол поворота между ударами долота (КНШ105) диаметром 105 мм для пневмоударника П-105ПМ при бурении скважин по слабобрудным кварцитам не должен превышать 3°. Его увеличение ведет к преждевременному изнашиванию инденторов и не повышает механическую скорость (табл. 2).

ТАБЛИЦА 2. Результаты экспериментов по определению рациональных режимов бурения пневмоударником П-105ПМ

Показатель	НКР100МПА		НКР100МА
Число оборотов n , об/мин	30	38	79
Частота ударов пневмоударника $f_{уд}$, Гц	21.4	21.4	21.4
Частота вращения $f_{вр}$, Гц	0.5	0.63	1.31
Угол между ударными нагрузками γ , град	8.4	10.6	22
Время полного оборота долота $t_{2\pi}$, с	2.0	1.6	0.76
Объем разрушенной породы за оборот $V_{2\pi}$, м ³ /об.	$2.76 \cdot 10^{-5}$	$2.76 \cdot 10^{-5}$	$1.31 \cdot 10^{-5}$
Толщина слоя отбитой породы за оборот $h_{2\pi}$, мм/об.	3.2	3.2	1.52
Число ударов за оборот s , уд/об.	42.8	33.7	16.3
Количество зон ударных воздействия на забой с учетом i, I_U	556.4	438.1	212
Забойная ударная мощность машины за оборот $W_{2\pi}$, Вт/об.	5050.4	3987.1	1923.4
Количество оборотов става на участке (L) n_U , об.	373		786
Энергия машины, затраченная на отрезке (L) E_U , Дж	1883799.2	1487188.3	1511792.4
Время прохождения участка (L) t_U , с	746	592	600
Энергетический критерий объемного разрушения горных пород на участке (L), k , 10^{-9}	5.47	4.32	4.39
Механическая скорость бурения V_M , мм/мин	96.5	121	120

Ниже приведены формулы для определения рациональных режимов бурения скважин погружными пневмоударниками:

Угол между ударными нагрузками γ , град	$\gamma = f_{вр} \cdot 360^\circ / f_{уд}$	—
Время полного оборота долота $t_{2\pi}$, с	$t_{2\pi} = 60 / n$	—
Объем разрушенной породы за оборот $V_{2\pi}$, м ³ /об.	$V_{2\pi} = V_U / n_U$	—
Количество оборотов на участке (L) n_U , об.	$n_U = f_{вр} t_U$	—
Толщина слоя отбитой породы за оборот $h_{2\pi}$, мм/об.	$h_{2\pi} = (V_{2\pi} / S_{заб}) 1000$	—
Число ударов за оборот s , уд/об.	$s = f_{уд} t_{2\pi}$	—
Количество зон ударных воздействия на забое скважины, с учетом i, I_U	$I_U = s \cdot i$	—
Забойная ударная мощность машины за оборот $W_{2\pi}$, т/об.	$W_{2\pi} = Es$	—
Энергия машины, затраченная на участке (L), E_U , Дж	$E_U = W_{2\pi} n_U$	—
Энергетический критерий объемного разрушения горных пород на контрольном отрезке L, k	$k = \frac{E_c(t)\alpha}{V_\rho(t)\rho v_\rho^2} \eta = (1 \div 4) 10^{-9}$	(1)

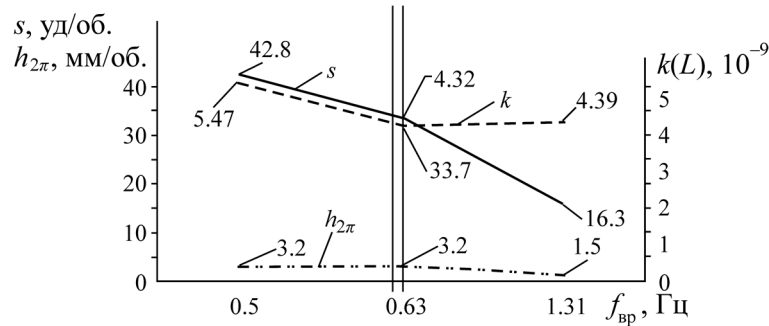


Рис. 8. Диаграмма определения рационального режима бурения пневмоударником П-105ПМ на станке НКР100МА

С увеличением шага забойной площади долота на 6 % путь холостого износа инденторов увеличился в 2 раза (рис. 9). Исследование подтверждает, что при ударно-вращательной проходке скважины механическая скорость бурения не может быть главным критерием для рационального выбора режима бурения, особенно ее максимальные показатели, так как одно и то же значение механической скорости бурения может относиться как к энергоэффективному, так и не эффективному бурению. Следовательно, энергетический подход в выборе рациональных режимов ударно-вращательного бурения является предпочтительным, поскольку при минимальной энергоёмкости разрушения горной породы происходит минимальное изнашивание твердого сплава бурового долота.

Характеризовать энергоэффективность бурения скважин могут и размерные величины. Так, взамен модифицированного выражения (1) можно использовать значения энергоёмкости разрушения горных пород, которая в случае пневмоударного бурения имеет следующий вид:

$$A = A_c \eta = \left(\frac{E_c(t)}{V_p(t)} \right) \eta, \quad (2)$$

где A — энергоёмкость разрушения горной породы с учетом энергии, подведенной к буровой колонне, и объема разрушенной породы на контрольном интервале проходки скважины, Дж/м³; A_c — энергоёмкость разрушения горной породы с учетом энергии, затрачиваемой погружным пневмоударником на разрушение объемов горной массы на контрольном интервале проходки скважины, Дж/м³; $E_c(t)$ — энергия воздуха, подведенная к буровой колонне, Дж; $V_p(t)$ — объем разрушенной породы при проходке контрольного интервала рейса буримой скважины.

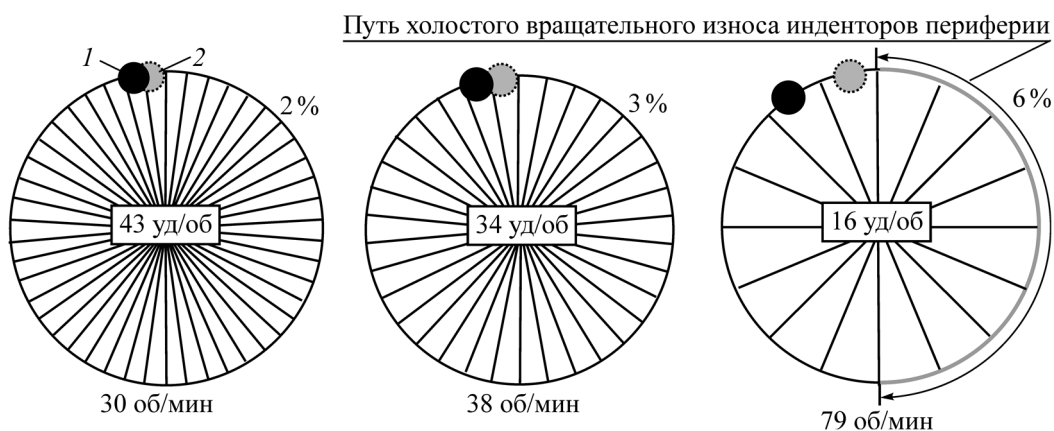


Рис. 9. Диаграммы интенсивности поражения забоя скважины при изменениях забойной мощности пневмоударника за счет частоты вращения става: 1 — место динамического воздействия индентором периферии; 2 — место нанесения следующего удара

При расчете энергоемкости бурового процесса по формуле (2) не учитывается коэффициент импульсного породоразрушающего воздействия инструмента на породный массив — a [22, 30], ρ — плотность породного массива месторождения (бурового участка), кг/м^3 и v — скорость продольной волны в породном массиве. Они неявно учитываются в коэффициенте полезного действия η , используемом в качестве коэффициента трансформации энергии от буровой колонны к забой скважины, как и в формуле для расчетов энергетического критерия объемного разрушения горных пород [16, 30].

Несмотря на несколько упрощенный характер определения энергоэффективности разрушения горной породы по формуле (2) при бурении скважин, значения энергоемкости не имеют явной связи с физико-механическими свойствами горных пород буровых участков из-за отсутствия значений ρ и v_ρ в их определении, а также ориентира энергоэффективности в диапазоне $k \in (1-4) \cdot 10^{-9}$, где при $k \rightarrow 1 \cdot 10^{-9}$ механическое разрушение горных пород приближается к идеальному [16]. Следовательно, использование безразмерной энергетической величины k по формуле (1), для определения энергоэффективных диапазонов бурения в различных горных породах — целесообразно.

ВЫВОДЫ

Установлено, что в качестве критерия оценки рационального режима бурения погружными пневмоударниками целесообразно использовать максимальный объем разрушенной породы при минимальном количестве ударных воздействий на забой скважины за один полный оборот долота, который определяет верхний предел рационального угла поворота долота пневмоударника между ударными нагрузками, обеспечивающий максимальную производительность бурения с минимальной энергоемкостью разрушения и износом твердосплавных инденторов бурового инструмента. Превышение этого предела путем увеличения частоты вращения става ведет к снижению объемов разрушенной породы за один оборот и преждевременному износу твердого сплава инденторов буровых долот, а уменьшение — к потере механической скорости бурения. Результаты натурных экспериментов показали, что определение рациональных режимов ударно-вращательного бурения для различных моделей пневмоударников целесообразно проводить по энергетическому критерию объемного разрушения горных пород, а также энергоемкости их разрушения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сухов Р. И., Болкисев В. С., Тымчур А. В., Поланский Г. А. Интенсификация процессов разрушения горных пород при механическом способе бурения взрывных скважин // ГИАБ. — 2004. — № 9. — С. 128–131.
2. Abu Bakar M. Z., Butt I. A., and Y. Majeed. Penetration rate and specific energy prediction of rotary-percussive drills using drill cuttings and engineering properties of selected rock units, J. Min. Sci., 2018, Vol. 54, Issue 2. — P. 270–284.
3. Rajib Ghosh, Hakan Schunnesson, and Anna Gustafson. Monitoring of drill system behavior for water-powered in-the-hole (ITH) drilling, Minerals, 2017, Vol. 7, Issue 7, – P.121. DOI: /10.3390/min7070121.
4. Xianfeng Song, Ole Morten Aamo, Pascal-Alexandre Kane, and Emmanuel Detournay. Influence of Weight-on-Bit on percussive drilling performance, J. Rock Mech. and Rock Eng., 2020. — P. 1–15. DOI: 10.1007/s00603-020-02232-x .
5. Еремьянц В. Э. Изменение энергетических и технологических показателей пневматических ударных машин в условиях высокогорья // ФТПРПИ. — 2017. — № 4. — С. 89–97.

6. **Жабин А. Б., Лавит И. М., Поляков А. В., Керимов З. Э.** Математическая модель разрушения горных пород ударным инструментом // ГИАБ. — 2020. — № 11. — С. 140–150.
7. **Нескоромных В. В., Головченко А. Е.** Экспериментальное исследование процесса разрушения горных пород внецентренными ударными импульсами при ударно-вращательном бурении // Изв. ТПУ. Инжиниринг георесурсов. — 2020. — Т. 331. — № 1. — С. 135–147.
8. **Жуков И. А.** Механика разрушения горных пород ударом при одновременном внедрении нескольких инденторов // Вестн. КузГТУ. — 2018. — № 1. — С. 93–98.
9. **Daiyan Ahmed, Yingjian Xiao, Jeronimo de Moura, and Stephen D. Butt.** Drilling cutting analysis to assist drilling performance evaluation in hard rock hole widening operation, Proc. ASME 2020, 39th Int. Conf. Ocean, Offshore and Arctic Engineering, Vol. 11: Petroleum Technology, Virtual, Online, August 3–7, 2020. V011T11A082. ASME. DOI: 10.1115/OMAEE2020-19286.
10. **Громадский А. С., Хруцкий А. А., Бобырь В. Г., Кузьменко Д. И.** Исследование и прогнозирование износа штыревых коронок-расширителей для бурения компенсационных шпуров и скважин в крепких породах // ГИАБ. — 2016. — № 7. — С. 24–31.
11. **Третьяк А. Я., Попов В. В., Гроссу А. Н., Борисов К. А.** Инновационные подходы к конструированию высокоэффективного породоразрушающего инструмента // ГИАБ. — 2017. — № 8. — С. 225–230.
12. **Маметьев Л. Е., Хорешок А. А., Цехин А. М., Борисов А. Ю.** Обоснование рациональных параметров расширителя скважин // Горное оборудование и электромеханика. — 2018. — № 6 (140). — С. 40–47.
13. **Bovin K. A., Gilev A. V., Shigin A. O., Kurchin G. S., and Kirsanov A. K.** Analysis of blast hole drilling at siberian open pit mines, Int. J. Mech. and Production Eng. Res. and Development, 2019, Vol. 9, No. 6. — P. 779–790.
14. **Городилов Л. В.** Об эффективности бурения скважин погружными гидроударными устройствами // Интерэкспо Гео-Сибирь. — 2018. — Т. 5. — С. 325–332.
15. **Zhang X., Luo Y., Gan X., and Yin K.** Design and numerical analysis of a large-diameter air reverse circulation drill bit for reverse circulation down-the-hole air hammer drilling, Energy Sci. Eng. 2019. — P. 1–9. DOI: 10.1002/ese3.321.
16. **Oparin V. N., Timonin V. V., Karpov V. N., and Smolyanitsky B. N.** Energy-based volumetric rock destruction criterion in the rotary-percussion drilling technology improvement, J. Min. Sci., 2017, Vol. 53, Issue 6. — P. 1043–1064.
17. **Кондратенко А. С., Тимонин В. В., Карпов В. Н., Попелюх А. И.** Пути повышения эффективности ударно-вращательного бурения скважин // Горн. журн. — 2018. — № 5. — С. 63–68.
18. **Karpov V. N. and Timonin V. V.** Importance of early adjustment of rotary-percussion drilling tool to mineral mining conditions, IOP Conf. Series: Earth and Environmental Sci., 2018, Vol. 134. — P. 012024.
19. **Кондратенко А. С., Смоленцев А. С., Карпов В. Н., Сырямин А. Т.** Опыт установки кондукторов в грунтах при сооружении дегазационных скважин с поверхности // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. — 2019. — Т. 6. — № 2. — С. 135–143.
20. **Aldred W., Bourque J., Chapman C., Castel B., Hansen R., Mannering M., Downton G., Harmer R., Falconer I., Florence F., Zurita E., Nieto C., Stauder R., and Zamora M.** Drilling Automation, Oilfield Rev., 2012, Vol. 24, No 2. — P. 18–27.
21. **Eremenko V. A., Karpov V. N., Timonin V. V., Shakhtorin I. O., and Barnov N. G.** Basic trends in development of drilling equipment for ore mining with block caving method, J. Min. Sci., 2015, Vol. 51, Issue 6. — P. 1113–1125.
22. **Karpov V. N., Timonin V. V., Konurin A. I., and Chernienkov E. M.** Improvement of drilling efficiency in underground mines in Russia, IOP Conf. Series: Earth and Environmental Sci., 2019, Vol. 262. — P. 012024. DOI: 10.1088/1755-1315/262/1/012024.

23. **Шадрина А. В., Саруев Л. А.** Анализ и научное обобщение результатов исследований ударно-вращательного способа бурения скважин малого диаметра из подземных горных выработок // Изв. ТПУ. Инжиниринг георесурсов. — 2015. — Т. 326. — № 8. — С. 120–136.
24. **Танайно А. С., Липин А. А.** Состояние и перспективы ударно-вращательного бурения взрывных скважин на карьерах // ФТПРПИ. — 2004. — № 2. — С. 82–93.
25. **Фокс Брайан.** Бурение взрывных скважин на открытых горных выработках // Издатель: Ульф Линде; Пер. на рус. яз. // Atlas Copco Drilling Solutions LLC, Garland, Texas, USA, 2011. — 274 с.
26. **A – Z of DTH drilling** / Halco Rock Tools Limited. — 05.2016 — 78 p.
27. **Atlas Sopco Rock Drilling Tools.** Secoroc Down-the-hole equipment: Operators instruction and spare parts list down-the-hole hammers / Atlas Copco Secoroc AB, Fagestra, Sweden, 2002. — 23 p.
28. **Technical specification DHD hammers** / Atlas Copco Secoroc AB. Update, February, — 2005. — 4 p.
29. **Громадский В. А.** Исследование влияния режимов работы на скорость бурения и энергозатраты станков шарошечного бурения типа СБШ-250 // ГИАБ. — 2014. — № 7. — С. 383–387.
30. **Карпов В. Н.** Разработка методики оценки энергоэффективности бурения скважин погружными пневмударниками: автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Новосибирск: ИГД СО РАН, 2019. — 24 с.
31. **Hartman H. L.** Basic studies of percussion drilling, Metall. and Pet. Eng., 1959, Vol. 214. — P. 68–75.
32. **Гилев А. В., Шигин А. О., Буткин В. Д.** Проектирование рабочих органов и режимных параметров буровых станков для сложноструктурных горных массивов. — Красноярск: СФУ, 2012. — 316 с.
33. **Логов А. Б., Герике Б. Л., Раскин А. Б.** Механическое разрушение крепких горных пород. — Новосибирск: Наука, 1989. — 141 с.
34. **Смоляницкий Б. Н.** Повышение эффективности и долговечности импульсных машин для сооружения протяженных скважин в породных массивах. — Новосибирск: СО РАН, 2013. — Т. 43 — С. 32–38.
35. **Погружные пневмударники Secoroc Q LX5:** инструкция по эксплуатации / Пер. на рус. яз. / Atlas Copco Secoroc AB Fagersta, Sweden. — 2015. — 34 с.
36. <https://www.youtube.com/watch?v=Qa0SL6h3pF8&list=FLAC6VXPBsUiUT6KbrQuWvBw&index=16>
37. **Ki-beom Kwon, Chang-heon Song, Jin-Young Park, Dae-Young Shin, Jung-Woo Cho, and Sang-Ho Cho.** Rock fragmentation assessment of a drill bit by Hopkinson Bar Percussion Test, Tunnel and Underground Space, February 2013, Vol. 23, Issue 1. — P. 42–53. doi:10.7474/TUS.2013.23.1.042
38. **Petreev A. M. and Primychkin A. Y.** Influence of air distribution system on energy efficiency of pneumatic percussion unit of circular impact machine, J. Min. Sci., 2015, Vol. 51, Issue 3. — P. 562–567. DOI: 10.1134/S1062739115030187.
39. **Симонов П. С.** Экспериментальное исследование дробления горной породы единичным ударом. // ГИАБ. — 2020. — № 1. — С. 71–79.
40. **Oparin V. N., Timonin V. V., and Karpov V. N.** Quantitative estimate of rotary-percussion drilling efficiency in rocks, J. Min. Sci., 2016, vol. 52, Issue 6. — P. 1100–1111.
41. **Тамбовцев П. Н.** Эффективный рабочий цикл пневмударной машины // Интерэкспо Гео-Сибирь. — 2018. — Т. 6. — С. 197–206.
42. **Липин А. А., Тимонин В. В., Танайно А. С.** Современные погружные ударные машины для бурения скважин // Каталог-справочник: Горная техника. — СПб.: ООО “Славутич”, 2006. — С. 116–123.
43. **Bo Presson.** How sharp rock drilling tools put money in the bank, Mining & Construction, 2012, No. 3. — P. 26–27.

Поступила в редакцию 16/III 2021

После доработки 11/V 2021

Принята к публикации 24/V 2021