

УДК 622.233.4

**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СКОРОСТИ ПРОХОДКИ И УДЕЛЬНОЙ ЭНЕРГИИ
БУРОВЫХ РАБОТ ВРАЩАТЕЛЬНО-УДАРНЫХ БУРОВЫХ МАШИН
НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА БУРОВОЙ МЕЛОЧИ
И МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОРОДЫ**

М. З. Абу Бакар¹, И. А. Батт², И. Маджид³

¹*Факультет инженерной геологии, Инженерно-Технологический Университет,
г. Лахор, Пакистан*

²*Факультет гражданского строительства, Университет Лахора,
г. Лахор, Пакистан*

³*Факультет горного дела, Инженерно-Технологический Университет,
г. Лахор, Пакистан*

Приведен прогноз скорости проходки и удельной энергии буровых работ вращательно-ударных машин, оборудованных буровыми коронками, зависящих от грансостава буровой мелочи и геомеханических свойств горных пород. Рабочие параметры буровых машин, измеренные в местах горных работ, использовались для расчета удельной энергии. Рассмотрены три текущих гидроэнергетических проекта и четыре действующих карьера Пакистана. Определены различные параметры распределения размеров мелочи, включая индекс крупности и константу Розина–Раммлера. Проведена серия геомеханических испытаний горных пород, определены прочность на сжатие, бразильская прочность на растяжение, прочность при точечном нагружении, твердость по Шмидту, скорость продольной волны, сухая плотность, пористость и показатели хрупкости. Выполнен регрессионный анализ для прогнозирования скорости проходки и удельной энергии бурения, зависящих от геомеханических свойств горных пород. Разработанные модели проверены с использованием критерия Стьюдента и критерия Фишера. Дана оценка скорости проходки по параметрам распределения размеров мелочи. Проведен анализ зависимости размера буровой коронки от индекса крупности и среднего размера частиц.

Скорость проходки, удельная энергия буровых работ, индекс крупности, константа абсолютного размера Розина–Раммлера, прочность на сжатие, бразильская прочность на растяжение, прочность при точечном нагружении, твердость по Шмидту, плотность, пористость, скорость распространения продольной волны

DOI: 10.15372/FTPRPI20180211

В Пакистане различные типы подземных выработок, в том числе автомобильные туннели, напорные туннели, гидроэнергетические выработки и железнодорожные туннели создаются с применением бурового и взрывного оборудования ввиду его универсальности, гибкости, экономичности и низких начальных капитальных затрат. Буровзрывные работы используются для образования выемки практически при любом состоянии массива горных пород в открытых и подземных работах, причем их стоимость возрастает по мере того, как длина проходки начинает

превышать 1.5–2.0 км [1]. Скорость проходки механическими агрегатами примерно на 40 % выше, чем при буровзрывных работах, однако из-за неожиданных изменений условий в подземных месторождениях, которые невозможно оценить заранее, механические способы становятся ограниченными в применении.

Эффективность любой операции бурения обычно измеряется с точки зрения скорости проходки и удельных затрат энергии, предназначенных для достижения этой скорости. Буримость, определяется интервалом времени, необходимым для заглубления бура в породу на единицу длины. Она широко используется для классификации горных пород в горнодобывающей промышленности и определяется набором параметров, включая геомеханические свойства горных пород и параметры буровой машины (вращение, осевое усилие, промывка и т. д.) [2]. Рабочий процесс (метод бурения, эксплуатация и техническое обслуживание машины) также играет важную роль в бурении пород. Как параметры буровой машины, так и рабочий процесс считаются контролируемыми параметрами при бурении горных пород [3].

Прогнозирование производительности бурового станка, а также туннелепроходческих машин, горнопроходческих комбайнов и буровых станков для проходки восстающих выработок с использованием распределения по размерам буровой мелочи по индексу крупности CI , среднему размеру частиц D' и медианному размеру d исследовано рядом специалистов. Так, в [4] сообщено о наличии зависимости между диапазоном размеров буровой мелочи и скоростью проходки. В [5] авторы сравнили площадь поверхности буровой мелочи со скоростью проходки погружной бурильной машины ДТН и обнаружили, что между ними нет никакой связи. В [6] пришли к выводу, что скорость износа коронок зависит от размера буровой мелочи; более крупные размеры буровой мелочи вызывают быстрый износ алмазных керновых долот, тем самым снижая скорость проходки. В [3, 7] исследована экспоненциальная зависимость скорости проходки от индекса крупности; зависимость скорости проходки от среднего размера частиц D' и удельной площади поверхности буровой мелочи. В [8] выдвинуто предположение о линейных корреляциях между скоростью проходки и индексом крупности и средним размером частиц буровой мелочи. Аналогично в [9] рассчитано значение индекса крупности *in situ* размера породы, взятого на разных глубинах проходки за один оборот проходческой машины. Получена линейная зависимость индекса крупности от скорости продвижения за один оборот. В [10] показана взаимосвязь между индексом крупности и константой абсолютного размера мелочи, найденной при выемке породы. В [11] исследовано разумное соотношение константы абсолютного размера и индекса крупности со скоростью продвижения дисковой фрезы постоянного поперечного сечения.

Физико-механические свойства горных пород — хорошие индикаторы скорости проходки. Ряд предыдущих исследователей установили соотношения, показывающие зависимость скорости проходки от свойств горных пород. При выполнении тестов вибрационно-вращательного бурения в полевых условиях установлено [12], что некоторые свойства горных пород (прочность на сжатие и бразильская прочность на растяжение) сильно влияют на процесс бурения. В [13] контролировали работу туннелепроходческой машины и бурильных машин ударного действия с алмазными бурильными коронками, найдена взаимосвязь скорости проходки с некоторыми физико-механическими свойствами осадочных пород. Выявлено, что пористость породы оказывает непосредственное влияние на буримость. При измерении скоростей бурения двух машин (15 и 20 кВт) обнаружены логарифмические соотношения скорости проходки с прочностью на сжатие и растяжение [14, 15]. Показано, что некоторые специфические свойства горных пород и геологические факторы существенно влияют на износ буровой коронки и скорость бурения. В [16] показано наличие корреляции между хрупкостью горных пород и индек-

сом буримости и подчеркнута, что хрупкость вызывает увеличение скорости проходки. Установлена значительная корреляция скорости проходки ударного бурения с прочностью на сжатие, бразильской прочностью на растяжение, прочностью при точечном нагружении и твердостью пород по Шмидту [17]. В [18] проведено сравнительное исследование различных методов испытаний, используемых для прогнозирования бурения в лабораторном масштабе, и представлены таблицы для выбора надежной буровой коронки на основе свойств горных пород. В [19] предложены эмпирические уравнения для оценки скорости бурения на основе моделей, полученных с учетом свойств горных пород 50 нефтяных скважин. Авторы [20] связывают механические свойства некоторых пород со скоростью проходки установкой вращательного бурения. Точно так же скорость бурения пневмоударников связана с сухой плотностью, прочностью на сжатие, бразильской прочностью на растяжение, упругой твердостью по Шмидту и модулем Юнга из девяти пород [21].

Удельная энергия SE определяется как энергия, необходимая для фрагментации единичного объема породы [22–25]. Согласно [26], она идет на создание новой площади поверхности. В [27] исследованы буровые станки вращательного действия, станки ударного бурения и ударно-вращательные станки в доломите Боннетер и обнаружена обратная зависимость между размером мелочи и удельной энергией бурения. Известно, что удельная энергия выемки породы существенно зависит от геометрических параметров инструмента, расстояния между фрезами, проходки инструмента и свойств горных пород [10, 28, 29]. Однако при вращательном бурении или выемке горных пород с использованием инструментов резания прочность на растяжение, прочность на сжатие и прочность на сдвиг являются доминирующими свойствами породы, влияющими на эффективность выемки [30, 31]. В [25] проведены полномасштабные испытания выемки породы с помощью конической фрезы и показано, что оптимальная удельная энергия есть прямая функция параметров горных пород (прочность на сжатие и бразильская прочность на растяжение). В [3] удельную энергию выемки горных пород связывали с тремя индексами хрупкости: $B_1 = \sigma_c / \sigma_t$, $B_2 = (\sigma_c - \sigma_t) / (\sigma_c + \sigma_t)$ и $B_3 = (\sigma_c \sigma_t) / 2$, где $\sigma_c = UCS$ и $\sigma_t = BTS$. Аналогично в [32] статистически оценивали соотношения между хрупкостью и режущей удельной энергией лезвия алмазной дисковой пилы и удельной энергией бурения поликристаллических алмазных коронок PDC. Найдены корреляции между индексами хрупкости B_1 , B_2 и B_3 и режущей удельной энергией, но не установлено взаимосвязи между удельной энергией бурения и величиной хрупкости.

Зависимости удельной энергии SE от скорости проходки и рабочих параметров буровой машины: $SE = F / A + (2\pi / A)(NT / PR)$ [23]; $SE = 4T_r P / \pi D^2 PR$ [33]; $SE = (20WN) / (DFt)$ [34]; $SE = 8TN / [(D_h^2 - D_c^2)PR]$ [35], где F — сила, приложенная к коронке; A — площадь поперечного сечения; N — скорость вращения; T — вращающий момент; PR — скорость проходки; T_r — коэффициент передачи энергии между породой и имеющейся энергией; P — общая ударная энергия; D — диаметр буровой коронки; W — вес, приложенный к коронке; Ft — длина проходки; t — время; D_h — диаметр скважины; D_c — диаметр керна.

В настоящее время буровые коронки вращательно-ударных буровых установок используются практически в каждом проекте по бурению скважин, но их скорости в различных горных породах Пакистана не описаны должным образом. Необходимы модели прогнозирования параметров буримости, основанные на физико-механических свойствах горных пород, распределении грансостава буровой мелочи и эксплуатационных параметрах буровой машины. В этом исследовании ряд параметров, включая фактическую скорость проходки коронок, измеренную

в полевых условиях, индекс крупности CI , константу Розина–Рамллера D' , удельную энергию бурения, показатели хрупкости и геомеханические свойства, определяются на участках горных пород, встречающихся в некоторых туннельных и горнодобывающих проектах. Полученные результаты будут важны для подрядчиков, участвующих в текущих и будущих проектах, таких как плотины, туннели, скоростные магистрали и фундаменты крупных зданий.

МЕТОДОЛОГИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

Методология исследования включает полевые и лабораторные испытания, а также расчеты удельной энергии бурения. Полевые работы проводились в Пакистане на семи текущих проектах прокладки туннелей и добычи полезных ископаемых (рис. 1) с исследованиями девяти различных отобранных типов пород. В табл. 1 представлены выбранные проекты, а также их образования и геологический возраст. В полевые работы входят регистрация параметров бурения, сбор буровой мелочи из скважин и выбор репрезентативных каменных блоков с рабочих мест.

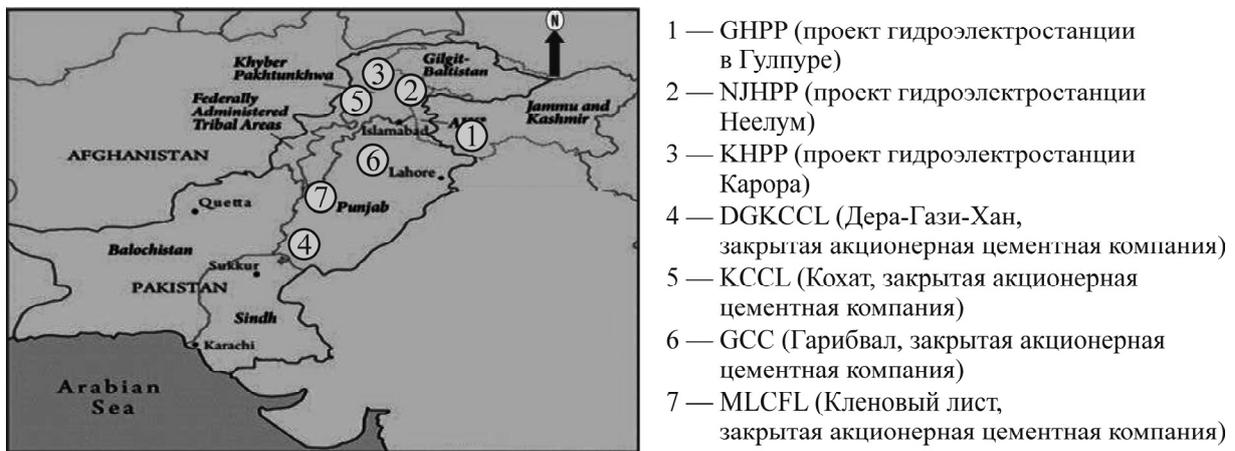


Рис. 1. Местоположение проектов, отмеченные на карте Пакистана

ТАБЛИЦА 1. Выбранные проекты горных работ, их места расположения и типы пород

Проект	Местоположение	Порода	Образование / группа	Геологический возраст
GHPP	Котли, Азад Кашмир, Пакистан	Песчаник Надри	Надри	Миоцен
NJHP	Музаффарабад Азад Джаммуи Кашмир, Пакистан	Песчаник Мурее	Мурее	Миоцен
KHPP	Бешам, Шангла, ХайберПахтунхва, Пакистан	Гранито-гнейс	Группа Бешам	Докембрий
KHPP	Бешам, Шангла, ХайберПахтунхва, Пакистан	Графитовый гнейс	Группа Бешам	Докембрий
DGKCCL	ХофлиСагтай, Дера-Гази-Хан, Пенджаб, Пакистан	Известняк Дунган	Известняк Дунган	Меловой
KCCL	Кохат, ХайберПахтунхва, Пакистан	Известняк Локхарт	Известняк Локхарт	Палеоцен
KCCL	Кохат, ХайберПахтунхва, Пакистан	Доломит	Смана сук	Юрский
GCL	Исмаилвал, Чаквал, Пенджаб, Пакистан	Известняк Сакасар	Известняк Сакасар	Эоцен
MLCFL	Искандерабад, Мианвали, Пенджаб, Пакистан	Известняк Наммал	Наммал	Эоцен

РЕГИСТРАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ БУРЕНИЯ В ПОЛЕВЫХ УСЛОВИЯХ

Буровые коронки, применяемые во вращательно-ударных бурильных машинах, использовались на отдельных проектах гидроэлектростанций и цементных карьерах. На рис. 2 показан процесс бурения, выполненный для анкерной крепи на NJHPP в песчанике Мурее с помощью гидробура Sandvick Power Pack HP555. Описание бурильных машин, размеров коронок, скоростей вращения и рабочих давлений приведено в табл. 2. Такие рабочие параметры, как давление подачи, давление вращения, рабочее давление и давление промывки, регистрировались во время бурения скважин. Скорость вращения и крутящий момент брались из каталогов соответствующих вращательно-ударных машин. Ежедневно пробуривалось 25 скважин для взрывных работ каждого проекта, а также для установки анкерных болтов. Зарегистрировано фактическое время бурения от 7 до 12 скважин в каждом выбранном блоке породы, а соответствующие глубины скважины были точно измерены. Кроме того, измерялись диаметр ствола скважины и диаметр буровой коронки. Глубина скважины и время бурения, вычисленные для каждой скважины в каждом выбранном блоке породы, использовались для расчета скорости проходки с помощью формулы

$$PR = \frac{\text{глубина скважины, м}}{\text{время бурения, мин}}. \quad (1)$$



Рис. 2. Гидравлическая вращательно-ударная буровая машина Sandvick Power Pack HP555, работающая на NJHPP

ТАБЛИЦА 2. Перечень буровых установок, используемых на выбранных разработках

Проект	Буровая установка (вращательно-ударная)	Коронка, мм	Скорость вращения, об./мин	Рабочее давление, кПа
КНРР	Atlas Copco XAS 186DD (выносной пневмоударник)	34	250.2	610
NJHPP	Sandvick Power Pack HP555 (гидравлическая буровая установка)	48	250.2	800
GHPP	Furukawa HCR180 (гидравлический выносной ударник)	65	130.2	650
КССЛ	Furukawa HCRC180R (гидравлический выносной ударник)	75	120.0	600
MLCFL	Ingersoll Rand-LM500 (гидравлический выносной ударник)	85	90.0	650
GCL	MP-CMP-0002 (выносной пневмоударник)	105	60.0	840
DGKCCL	Atlas Copco ROCL6 (погружная бурильная машина)	105	70.2	850

Средняя фактическая скорость проходки 7–12 скважин в каждом выбранном блоке породы, определенная в полевых условиях, рассчитывалась по формуле (1) и применялась для последующего анализа.

Расчет удельной энергии SE бурения проведен для каждой из отобранных пород по значениям измеренных параметров бурения буровых машин [23]:

$$SE = SE_t + SE_r, \quad SE_t = \frac{F}{A}, \quad SE_r = \frac{2\pi NT}{A PR}, \quad (2)$$

где SE , SE_t — удельная энергия и удельная энергия подачи, МДж/м³; SE_r — удельная энергия, идущая на вращение, МДж/м³; F — сила, приложенная к коронке, кН; A — площадь поперечного сечения скважины, м²; N — скорость вращения, об./с; T — крутящий момент, кН·м; PR — скорость проходки, м/с.

Буровую мелочь из отдельных буровых скважин каждой горной породы складывали в полиэтиленовые мешки и маркировали. Чтобы предотвратить возможную ошибку удаления этикетки с мешков, буровая мелочь дополнительно сохранялась в пластиковых банках в лаборатории. В дополнение к этому отбирались блоки пород подходящих размеров в той же области полевых работ без трещин и микронарушений, чтобы получить максимальное количество кернов для проведения исследований физических и механических свойств.

Выполнена серия лабораторных экспериментов, состоящих из ситового анализа буровой мелочи, собранной с буровых площадок, исследований механических свойств горных пород: прочность на сжатие, бразильская прочность на растяжение, прочность при точечном нагружении и твердость по Шмидту, плотность, пористость и скорость звука. Для проведения испытаний по определению механических и физических свойств пород керны извлекались из собранных блоков ортогонально слоям, с использованием режущих долот диаметром 54 мм. Образцы цилиндрической породы подготавливали в соответствии с рекомендациями, изложенными в стандартах ASTM D4543 [36].

Корреляция между эксплуатационными характеристиками буровых машин и распределением буровой мелочи может быть описана с помощью индекса крупности CI и константы абсолютного размера D' . Эти параметры использовались предыдущими исследователями [3, 8, 10, 11, 37] для оценки производительности различных систем выемки и бурения горных пород. Индекс крупности — безразмерное число, которое получается суммированием кумулятивного остатка буровой мелочи, сохраненного на ситах. Диапазон индекса крупности зависит от конкретного набора используемых сит [37]. Константу абсолютного размера D' распределения частиц можно найти из уравнения Розина – Раммлера [38] в экспоненциальной форме:

$$R = 100 \exp \left[- \left(\frac{x}{D'} \right)^b \right], \quad (3)$$

где R — кумулятивная масса (объем, %), сохраненная на сите с размером ячейки x ; D' — константа абсолютного размера; b — параметр распределения.

Разделим (3) на 100 и дважды прологарифмируем полученное выражение:

$$\ln \left[\ln \left(\frac{100}{R} \right) \right] = b \ln x + \text{const}. \quad (4)$$

Значения $\ln[\ln(100/R)]$ при построении графика от $\ln x$ дают прямую линию. Наклон этой прямой и пересечение на горизонтальной линии при $R=36.79\%$ позволяют найти параметры Розина–Раммлера b и D' соответственно. Оба этих параметра полностью определяют распределение частиц по размерам.

В настоящей исследовательской работе буровая мелочь из 7–12 скважин на каждом из девяти отобранных породных блоков просеивалась с помощью семи ситовых фракций +19.00 мм, +9.51, +4.76, +2.00, +1.00, +0.50 и +0.25 мм для определения значения индекса крупности. В табл. 3 показан примерный расчет индекса для известняка Локхарта. Константа абсолютного размера D' рассчитывалась с использованием графика Розина–Раммлера суммарного веса (%) в зависимости от размера отверстия сита по методике [39].

На рис. 3 приведен график Розина–Раммлера, построенный по данным, представленным в табл. 3. В нем определены D' и b для буровой мелочи, собранной из скважины № 1 той же породы (известняк Локхарта).

ТАБЛИЦА 3. Определение индекса крупности рассева буровой мелочи (скважина № 1 в известняке Локхарта, диаметр буровой коронки 75 мм)

Ситовая фракция, мм	Остаток на сите, г	Остаток на сите, %	Кумулятивный остаток на сите, %
+19.00	0	0	0
–19.00+9.51	60	1.65	1.65
–9.51+4.76	134	3.68	5.33
–4.76+2.00	1202	33.05	38.38
–2.00+1.00	794	21.83	60.21
–1.00+0.50	532	14.63	74.84
–0.50+0.25	592	16.28	91.12
Чашка весов	323	8.88	100.00
Общая масса	3637	—	$CI=372$

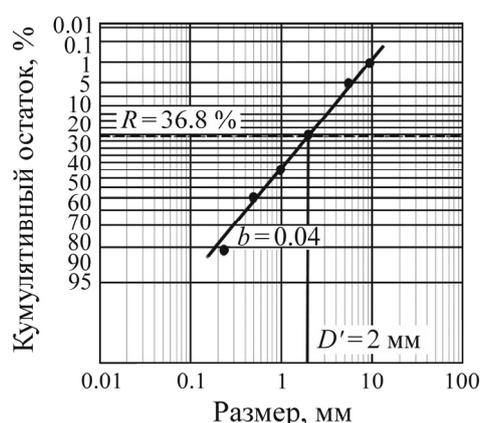


Рис. 3. Определение параметров D' и b по уравнению Розина–Раммлера для образца известняка Локхарта (нанесено на график согласно [11])

Испытания прочности на сжатие (UCS) проводились на образцах породы цилиндрической формы, которые имели отношение длины к диаметру от 2.0 до 2.5 в соответствии с процедурой, указанной в стандарте ASTM D7012 [40]. Испытания BTS выполнялись в соответствии с рекомендациями стандарта ASTM D3967 [41]. Подготовленные породные диски имели отношение высоты к диаметру, равное приблизительно 0.5.

Испытания *PLS* проводились на образцах керна по стандарту ASTM D5731 [42]. Выполнялось поперечное нагружение кернов породы коническими валиками машины. Отношение длины к диаметру образцов находилось в диапазоне 1.0–1.5. Нагрузка постепенно увеличивалась в течение 10–60 с до тех пор, пока не происходило разрушение.

Ударные испытания *SRH* осуществлялись на цилиндрических образцах породы с помощью ударного молота Шмидта *N*-типа с энергией удара 2.207 Н·м. Измерения проводились в соответствии с методом ASTM D873 [43]. Среднее значение десяти наивысших отскоков, измеренных с помощью устройства *N*-типа, преобразовано в значение отскоков *L*-типа с помощью формулы, предложенной в [44].

Скорости волн V_p измерялись в лаборатории с использованием цифрового портативного ультразвукового неразрушающего индикатора по методу ISRM [45]. Преобразователи индикатора располагались на обоих торцах кернов пород. Скорости V_p вычислялись путем измерения времени распространения звуковых импульсов через образцы.

Естественную плотность включенных породных блоков находили путем определения массы и объема подготовленных образцов керна. Массу образца горной породы вычисляли с точностью 0.01 г, а объем рассчитывали по средним значениям длины и диаметра горной породы, измеренным цифровым штангенциркулем. Пористость образцов горных пород определялась методом насыщения ISRM [46].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ И ОБСУЖДЕНИЕ

В табл. 4 приведены значения скорости проходки *PR* и удельной энергии *SE*, рассчитанные по данным, относящимся к рабочим параметрам буровых машин. Окончательные результаты, полученные в лабораторных испытаниях, включая индекс крупности *CI*, константу абсолютного размера Розина–Рамлера D' , физико-механические свойства пород и индексы хрупкости (табл. 5). Результаты измерений *UCS* и *BTS* дополнительно использовались для расчета индексов хрупкости пород, включая B_3 и B_4 для каждого типа горной породы. В этом исследовании обсуждение результатов в первую очередь сосредоточено на установлении связей скорости проходки и удельной энергии бурения со свойствами пород, а также корреляций скорости проходки и диаметра буровой коронки с индексом крупности и константы D' . Кроме того, обсуждается подтверждение разработанных взаимосвязей (т. е. скорости проходки и удельной энергии бурения) на основе статистических методов (*F*-тест и *t*-тест).

ТАБЛИЦА 4. Средние значения скорости проходки *PR* и удельной энергии *SE*, рассчитанные по рабочим параметрам бурильных машин, измеренным в полевых исследованиях

Проект	Порода	<i>PR</i> , м/мин	Диаметр скважины, м	Сила подачи, кН	Крутящий момент, кН·м	<i>SE</i> , МДж/м ³
NJHP	Песчаник Мурее	0.43	0.05	2.03	0.06	185.08
GCL	Известняк Сакесар	0.51	0.11	8.99	0.52	107.43
KHP	Гранито-гнейс	0.61	0.03	0.71	0.01	36.53
KCCL	Доломит	0.77	0.08	3.11	0.12	30.70
KCCL	Известняк Локхарт	0.75	0.08	3.11	0.12	32.51
DGKCCL	Известняк Дунган	0.83	0.12	10.76	0.67	38.92
KHP	Графитовый гнейс	0.98	0.03	0.71	0.01	24.19
GHPP	Песчаник Надри	1.05	0.07	3.37	0.13	23.58
MLCFL	Известняк Наммал	1.14	0.09	4.26	0.19	20.16

ТАБЛИЦА 5. Результаты лабораторных экспериментов горных пород, встречающихся на отдельных участках проекта

Порода	CI	D' , мм	UCS	BTS	PLS	SRH	B_3	B_4	N , %	ρ , г/см ³	V_p , км/с
			МПа								
Песчаник Мурее	277	1.02	125	11.50	5.50	48.0	718.75	26.81	1.81	2.64	4.49
Известняк Сакесар	415	2.86	94	8.50	4.41	46.2	399.50	19.99	1.31	2.67	5.19
Гранито-гнейс	244	0.66	70	7.70	3.30	44.2	269.50	16.42	5.76	2.00	4.10
Доломит	313	1.40	66	6.75	3.00	38.3	222.75	14.92	5.42	2.60	5.84
Известняк Локхарт	350	1.65	66	7.10	3.20	40.0	234.30	15.31	9.33	2.67	6.24
Известняк Дунган	373	2.12	60	7.16	3.17	38.9	214.80	14.66	33.06	2.58	5.70
Графитовый гнейс	259	0.52	54	5.97	2.89	37.0	161.19	12.70	20.00	3.00	3.30
Песчаник Нагари	303	1.40	47	4.00	2.00	33.0	94.00	9.70	25.78	2.63	3.78
Известняк Наммал	402	2.12	33	3.50	1.50	30.0	57.75	7.60	30.00	2.50	5.60

Примечание. $B_3 = (UCS \times BTS) / 2$, $B_4 = \sqrt{B_3}$ — индексы хрупкости

Связи величин PR и SE с механическими и физическими свойствами пород показаны на рис. 4. Видно, что существуют значительные корреляции значений скорости проходки, а также удельной энергии бурения с UCS , BTS , PLS , SRH , B_3 , B_4 и n . Как и ожидалось, скорость проходки линейно уменьшается с увеличением прочности UCS , BTS , PLS , твердости SRH и величин хрупкости B_3 и B_4 исследованных пород, тогда как наблюдается восходящий линейный тренд между PR и пористостью породы. Аналогичные связи скорости проходки с инженерными свойствами горных пород отмечены в [17, 20, 21, 47]. Найдены значительные линейные корреляции удельной энергии бурения с UCS , BTS , PLS , SRH , B_3 , B_4 . Что касается влияния пористости, то наблюдается нелинейное снижение удельной энергии бурения с ростом n . Взаимосвязи удельной энергии бурения с физико-механическими свойствами пород, полученные в более ранних исследованиях, точно совпадают с корреляциями, установленными в данной работе [25, 48–51].

По полученным данным разработаны модели прогнозирования (табл. 6) для оценки PR и SE . Модели скорости проходки, основанные на SRH , B_4 , BTS , UCS , PLS и BTS , показали лучшую способность прогнозирования по сравнению с моделями, разработанными на связи с B_3 и пористостью. Аналогично модели удельной энергии бурения, основанные на параметрах породы, включая B_3 , B_4 , UCS и PLS , демонстрируют лучшую способность прогнозирования, чем другие отношения. Для подтверждения значимости предложенных корреляций PR и SE с характеристиками горных пород (табл. 6) использовались расчеты F -теста и t -теста программного пакета SPSS-21 для Windows.

ТАБЛИЦА 6. Регрессионные модели, разработанные для прогнозирования PR и SE по физико-механическим свойствам пород

Скорость проходки, м/мин	R^2	Удельная энергия, МДж/м ³	R^2
$PR = -0.008UCS + 1.348$	0.86	$SE = 1.923UCS - 75.945$	0.88
$PR = -0.096BTS + 1.447$	0.89	$SE = 19.871BTS - 81.831$	0.73
$PR = -0.191PLS + 1.397$	0.87	$SE = 42.085PLS - 80.011$	0.81
$PR = -0.040SRH + 2.380$	0.97	$SE = 7.176SRH - 228.124$	0.59
$PR = -0.001B_3 + 1.067$	0.77	$SE = 0.270B_3 - 15.738$	0.93
$PR = -0.041B_4 + 1.406$	0.89	$SE = 8.932B_4 - 81.613$	0.83
$PR = 0.016n + 0.544$	0.71	$SE = -2.541n + 92.851$	0.33

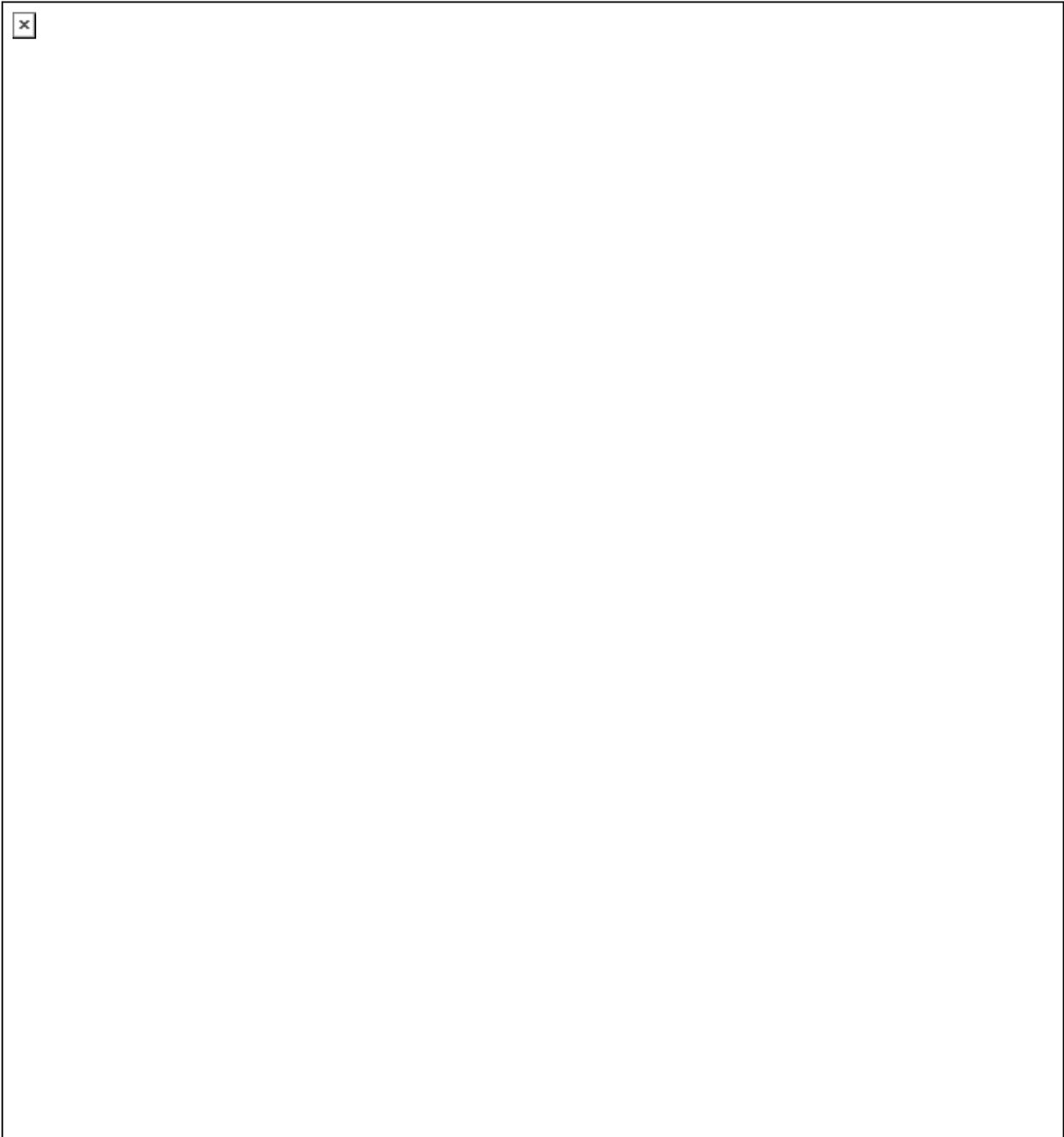


Рис. 4. Линейные корреляции скорости проходки и удельной энергии бурения с геомеханическими параметрами свойств пород

В табл. 7 и 8 представлены расчетные и табличные значения F -теста с соответствующими p -значениями на уровне значимости 95 % ($\alpha = 0.05$) для предложенных моделей прогнозирования PR и SE по данным геомеханических свойств пород. Видно, что значения $F_{\text{мод}}$ больше, чем $F_{\text{крит}}$ при заранее заданном уровне значимости. Отметим, что p -значения независимых переменных (UCS , BTS , PLS , SRH , B_3 , B_4 и n) меньше значения α , что указывает на их точное определение. Точно так же при 95 % доверительном уровне расчетные $|t_{\text{расч}}|$ больше, чем табличные значения t в табл. 7 и 8. Следовательно, предложенные модели статистически значимы.

ТАБЛИЦА 7. Подтверждение значимости моделей регрессии, разработанных для прогнозирования скорости проходки по физико-механическим свойствам пород

Геомеханическое свойство	R^2	$F_{\text{мод}}$	$F_{\text{крит}}$	p -значение	$t_{\text{расч}}$	$t_{\text{табл}}$
<i>UCS</i>	0.86	41.31	5.32	0.000	-6.43	1.86
<i>BTS</i>	0.89	58.24	5.32	0.000	-7.63	1.86
<i>PLS</i>	0.87	47.04	5.32	0.000	-6.86	1.86
<i>SRH</i>	0.97	248.35	5.32	0.000	-15.76	1.86
B_3	0.77	24.02	5.32	0.002	-4.90	1.86
B_4	0.89	56.31	5.32	0.000	-7.50	1.86
n	0.71	16.75	5.32	0.005	4.09	1.86

ТАБЛИЦА 8. Подтверждение значимости регрессионных моделей, разработанных для прогнозирования удельной энергии по физико-механическим свойствам пород

Геомеханическое свойство	R^2	$F_{\text{мод}}$	$F_{\text{крит}}$	p -значение	$t_{\text{расч}}$	$t_{\text{табл}}$
<i>UCS</i>	0.88	53.46	5.32	0.000	7.31	1.86
<i>BTS</i>	0.73	18.93	5.32	0.003	4.35	1.86
<i>PLS</i>	0.81	30.08	5.32	0.001	5.48	1.86
<i>SRH</i>	0.59	9.99	5.32	0.016	3.16	1.86
B_3	0.93	91.41	5.32	0.000	9.56	1.86
B_4	0.83	33.14	5.32	0.001	5.76	1.86

ВЗАИМОСВЯЗЬ СКОРОСТИ ПРОХОДКИ С КОНСТАНТОЙ АБСОЛЮТНОГО РАЗМЕРА И ИНДЕКСА КРУПНОСТИ

Выявлена взаимосвязь значений CI и D' с соответствующими показателями скорости проходки горных пород, измеренными в выбранном месте бурения. Для каждой группы горных пород скорости проходки PR как функции CI и D' представлены на рис. 5. Отмечены положительные линейные корреляции скоростей проходки с соответствующими значениями CI и D' . Модели, разработанные таким образом (табл. 9), могут использоваться для прогнозирования скорости проходки PR коронок вращательно-ударных буровых машин по значениям индекса крупности CI и константы абсолютного размера D' . В [59] разработаны формулы для оценки PR от CI и средних значений размера частиц только для известняковой породы. Аналогично в [7] приведены линейные и экспоненциальные соотношения PR с индексом крупности и средним размером частиц на основе данных о бурении, собранных в карьерах из известняка и мергеля. В настоящем исследовании установлены линейные корреляции. В [8] предложены зависимости, определяющие скорости проходки по значениям CI и средних размеров частиц буровой мелочи.

ТАБЛИЦА 9. Предлагаемые регрессионные модели PR с CI и D'

Порода	$PR(CI)$	R^2	$PR(D')$	R^2
Песчаник Мурее	$PR = 0.004CI - 0.698$	0.94	$PR = 0.199D' + 0.226$	0.86
Известняк Сакесар	$PR = 0.003CI - 0.776$	0.87	$PR = 0.118D' + 0.172$	0.90
Гранито-гнейс	$PR = 0.006CI - 0.778$	0.89	$PR = 0.436D' + 0.319$	0.87
Доломит	$PR = 0.004CI - 0.420$	0.91	$PR = 0.252D' + 0.437$	0.90
Известняк Локхарт	$PR = 0.001CI + 0.335$	0.91	$PR = 0.094D' + 0.598$	0.87
Известняк Дунган	$PR = 0.009CI - 2.337$	0.94	$PR = 0.283D' + 0.301$	0.79
Графитовый гнейс	$PR = 0.005CI - 0.198$	0.96	$PR = 0.428D' + 0.757$	0.90
Песчаник Надри	$PR = 0.002CI + 0.527$	0.88	$PR = 0.109D' + 0.895$	0.90
Известняк Наммал	$PR = 0.005CI - 0.843$	0.91	$PR = 0.236D' + 0.541$	0.85

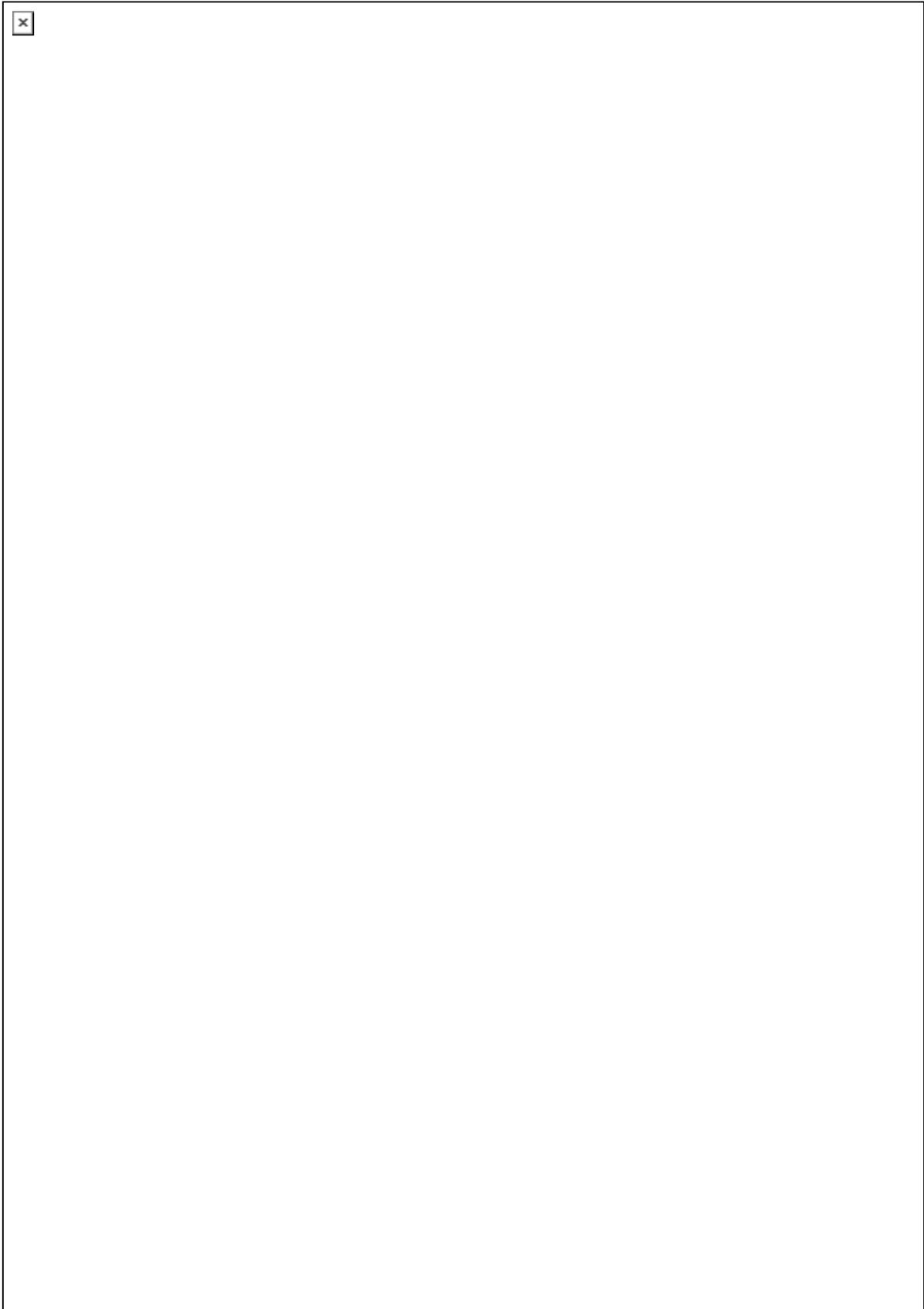


Рис. 5. Линейные корреляции скорости проходки с индексом крупности и абсолютной константой размера девяти отобранных пород

ВЛИЯНИЕ РАЗМЕРОВ БУРОВОЙ КОРОНКИ НА D'

Видно, что CI и D' показывают линейно возрастающий тренд (рис. 6) с ростом диаметра буровой коронки. Аналогичная тенденция зависимости CI от диаметра буровой коронки обнаружена в [27]. Сделан вывод, что размер мелочи породы увеличивается линейно с размером буровой коронки до определенного диаметра. Дальнейшее увеличение диаметра буровой коронки приводит к уменьшению размера мелочи породы в зависимости от типа бурильной машины (выносной ударник или погружной) и геологических разрывов (система трещин, плоскость напластования, слоистость и т. д.).

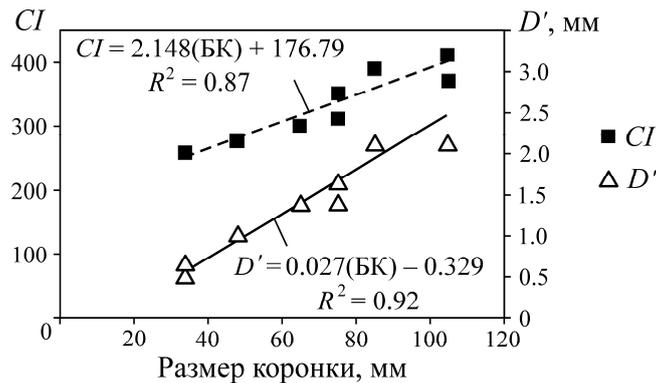


Рис. 6. Взаимосвязь CI и D' с размером буровой коронки

ВЫВОДЫ

Прогнозирование скорости проходки и удельной энергии бурения часто требуется в горнодобывающих проектах и при прокладке туннелей. Эти параметры зависят как от свойств горных пород (механических и физических), так и от рабочих параметров бурильной машины. Настоящее исследование включает в себя определение скорости проходки и удельной энергии бурения вращательно-ударных буровых машин на примере семи действующих предприятий Пакистана, охватывающих в общей сложности девять различных горных пород. Ситовый анализ собранной буровой мелочи выполнен для расчета индекса крупности и среднего размера частиц. Для определения физико-механических свойств и индексов хрупкости проведены механические испытания рассматриваемых горных пород.

Сделан вывод, что параметры UCS , BTS , PLS , SRH , B_3 , B_4 в значительной мере определяют значения скорости проходки и удельной энергии бурения вращательно-ударных буровых машин. Среди физико-механических характеристик свойств пород параметры прочности PLS и SRH могут быть легко получены в полевых условиях и использованы для оценки PR и SE из предложенных регрессионных зависимостей.

Значимые положительные линейные корреляции скорости проходки с индексом крупности CI и константой абсолютного размера D' установлены для каждой группы горных пород. Самые высокие значения индекса крупности и среднего размера частиц бурильной мелочи соответствуют более высоким значениям буримости. Это объясняется тем, что большая часть энергии для бурения потребляется при разрушении породы на поверхности соприкосновения породы и инструмента. Предложены линейные корреляции между диаметром буровой коронки и параметрами грансостава бурильной мелочи CI и D' .

Будущие исследования могут быть направлены на изучение влияния других параметров породы, таких как петрография, ориентация и ослабление прочности на границах слоев породы в прогнозировании скорости проходки и удельной энергии бурения от физико-механических свойств CI и D' .

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **McFeat-Smith I. and Fowell R. J.** Selection and application of roadheaders for rock tunnelling, Rapid Excavation and Tunnelling Conference, RETC, Atlanta, 1979.
2. **Tanaino A. S.** Rock classification by drillability Part I: analysis of the available classifications, *J. Min. Sci.*, 2005, Vol. 41. — P. 541–549.
3. **Altindag R.** Correlation of specific energy with rock brittleness concepts on rock cutting, *J. South Afr. Inst. Min. Metall.*, 2003, Vol. 103, No. 3. — P. 163–172.
4. **Pfleider E. P. and Blake R. L.** Research on the cutting action of the diamond drill bit, *Mining Engineering*, 1953, Vol. 5 — P. 187–195.
5. **Rabia H. and Brook N.** An Empirical equation for drill performance prediction, Proc. 21st Symposium on Rock Mechanics, University of Missouri-Rolla, USA, 1980. — P. 104–112.
6. **Ersoy A. and Waller M. D.** Drilling detritus and the operating parameters of thermally stable PDC core bits, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 1997, Vol. 34, No. 7. — P. 1109–1123.
7. **Altindag R.** Evaluation of drill cuttings in prediction of penetration rate by using coarseness index and mean particle size in percussive drilling, *Geotechnical and Geological Engineering*, 2004, Vol. 22. — P. 417–425.
8. **Kahraman S., Develi K., and Yasar E.** Predicting the penetration rate of percussive blast hole drills using coarseness index and median particle size, *CIM Bulletin*, 2004, Vol. 97, No. 15. — P. 1–4.
9. **Tuncdemir H., Bilgin N., Copur H., and Balci C.** Control of rock cutting efficiency by muck size, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 2008, Vol. 45. — P. 278–288.
10. **Abu Bakar M. Z. and Gertsch L. S.** Radial pick cutting performance in dry and saturated sandstone, *Society for Mining, Metallurgy and Exploration*, 2012, Vol. 332. — P. 396–405.
11. **Abu Bakar M. Z., Gertsch L. S., and Rostami J.** Evaluation of fragments from disc cutting of dry and saturated sandstone, *Rock Mechanics Rock Engineering*, 2014, Vol. 47. — P. 1891–1903.
12. **Selmer-Olsen R. and Blindheim O. T.** On the drillability of rock by percussive drilling, *Proceedings of the 2nd Congress of the International Society for Rock Mechanics*, Belgrade, Yugoslavia, 1970. — P. 65–70.
13. **Howarth D. F., Adamson W. R. and Berndt J. R.** Correlation of model tunnel boring and drilling machine performances with rock properties, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 1986, Vol. 23. — P. 171–175.
14. **Thuro K. and Spaun G.** Introducing the ‘destruction work’ as a new rock property of toughness referring to drillability in conventional drill and blast tunnelling, *Barla G (ed) Eurock 96; Prediction and Performance in Rock Mechanics and Rock Engineering*, 1996, Vol. 2. — P. 707–713.
15. **Thuro K.** Drillability prediction: geological influences in hard rock drill and blast tunnelling, *Geol. Rundsch.*, 1997, Vol. 86. — P. 426–438.
16. **Altindag R.** The evaluation of rock brittleness concept on rotary blast hole drills, *J. South Afr. Inst. Min. Metall.*, 2002, Vol. 102. — P. 61–66.
17. **Kahraman S., Bilgin N., and Feridunoglu C.** Dominant rock properties affecting the penetration rate of percussive drills, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 2003, Vol. 40. — P. 711–723.
18. **Dahl F., Bruland A., Jakobsen P. D., Nilsen B., and Grøv E.** Classifications of properties influencing the drillability of rocks, based on the NTNU/SINTEF test method, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2012, Vol. 28. — P. 150–158.
19. **Seifabad M. C. and Ehteshami P.** Estimating the drilling rate in Ahvaz oil field, *J. Petrol. Exploration Prod. Technology*, 2013, Vol. 3. — P. 169–173.
20. **Ngerebara O. D. and Youdeowei P.** Correlation of mechanical properties of some rocks in South-Eastern Nigeria, *Int. J. Sci. and Res. Pub.*, 2014, Vol. 4. — P. 1–6.
21. **Hoseinie S. H., Ataei M., and Aghababaie -A.** A laboratory study of rock properties affecting the penetration rate of pneumatic top hammer drills, *J. Min. and Env.*, 2014, Vol. 5. — P. 25–34.

22. **Protodyakonov M. M.** Mechanical properties and drillability of rocks, In: Proceedings of the 5th Symp. on Rock Mech., University of Minnesota, 1962. — P. 103–18.
23. **Teale R.** The concept of specific energy in rock drilling, *Rock Mechanics Mining Science*, 1964, Vol. 2. — P. 57–73.
24. **Mellor M.** Normalization of specific energy values, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 1972, Vol. 9. — P. 661–663.
25. **Copur H., Tuncdemir H., Bilgin N., and Dincer T.** Specific energy as a criterion for the use of rapid excavation systems in Turkish mines, *Trans. Inst. Min. Metall Sect. a Min. Technology*, 2001, Vol. 110. — P. A149–A157.
26. **Rabia H.** Specific energy as a criterion for drill performance prediction, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech.*, 1982, Vol. 19. — P. 39–42.
27. **Bullock R. L.** Tunneling and underground construction techniques, *Mining 383 Course*, Missouri University of Science and Technology, Rolla, MO, USA, 2009.
28. **Roxborough F. F.** Research in mechanical rock excavation: progress and prospects, *Proceedings of the Rapid Excavation and Tunneling Conference*, 1985, Vol. 1. — P. 225–243.
29. **Fowell R. J.** The mechanics of rock cutting, *Hudson J. A., Editor, Comprehensive rock engineering*, 1993, Vol. 4. — P. 155–75.
30. **Evans I.** A Theory on the basic mechanics of coal ploughing, *Proceedings of the International Symposium on Mining Research*, Missouri, 1961, Vol. 2. — P. 761–798.
31. **Nishimatsu Y.** The mechanics of rock cutting, *Int. J. Rock Mech. Mining Sci.*, 1972, Vol. 9. — P. 261–270.
32. **Atici U. and Ersoy A.** Correlation of specific energy of cutting saws and drilling bits with rock brittleness and destruction energy, *J. of Materials Processing Technology*, 2008, Vol. 209. — P. 2602–2612.
33. **Paone J., Madson D., and Bruce W. E.** Drillability studies — laboratory percussive drilling, *USBM RI 7300*, 1969.
34. **Moore P. L.** *Drilling practices manual*, Penn Well Books, Tulsa, 1974.
35. **Huang S. L. and Wang Z. W.** The mechanics of diamond core drilling of rocks, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abst.*, 1997, Vol. 34 — P. 6–12.
36. **ASTM D4543.** Standard practices for preparing rock core as cylindrical test specimens and verifying conformance to dimensional and shape tolerances, 2008.
37. **Roxborough F. F. and Rispin A.** The mechanical cutting characteristics of the lower chalk, *Tunnels and Tunnelling*, 1973. — P. 45–67.
38. **Rosin P. and Rammler B.** The laws governing the fineness of powdered coal, *J. Inst Fuel*, 1933, Vol. 7. — P. 29–36.
39. **Aytekin Y.** The measurement methods of fine particle, *Ege Univ., Press No. 2*, 1979. — P. 114.
40. **ASTM D7012.** Standard test method for compressive strength and elastic moduli of intact rock core specimens under varying states of stress and temperatures, 2010a.
41. **ASTM D3967.** Standard test method for splitting tensile strength of intact rock core specimens, *ASTM International*, West Conshohocken, PA, 2016. doi.org/10.1520/D3967-16.
42. **ASTM D573.** Standard test method for determination of the point load strength index of rock and application to rock strength classification, 2008.
43. **ASTM D83.** Standard test method for determination of rock hardness by rebound hammer method, 2005.
44. **Aydin A.** ISRM suggested method for determination of the Schmidt Hammer rebound hardness: Revised version, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 2009, Vol. 46, No. 3. — P. 627–634.
45. **ISRM.** Suggested methods for determining sound velocity, *Int. J. of Rocks Mechanics and Mining Sciences and Geo-mechanics*, 1978, Vol. 15. — P. 53–58.

46. **ISRM.** Suggested methods for determining water content, porosity, density, absorption and related properties and swelling and slake-durability index properties, *Int. J. of Rocks Mechanics and Mining Sciences and Geo-mechanics*, 1979, Vol. 16. — P. 141–156.
47. **Bilgin N. and Kahraman N.** Drillability prediction in rotary blast hole drilling, 1st Int. Mining Congress and Exhibition of Turkey-IMCET, 2003.
48. **Roxborough F. F. and Sen G. C.** Breaking coal and rock, *Australasian Coal Mining Practice*, 1986, Vol. 12. — P. 130–147.
49. **Bilgin N., Seyrek T., and Sahriar K.** Roadheader performance in Istanbul, Golden Horn clean up contributes valuable data, *Tunnels and Tunnelling*, 1988, Vol. 20, No. 6. — P. 41–47.
50. **Reddish D. J. and Yasar E.** A new portable rock strength index test based on specific energy of drilling, *Int. J. of Rock Mechanics Mining Sciences and Geo-mechanics*, 1996, Vol. 33, No. 5. — P. 543–548.
51. **Tiryaki B. and Dikmen A. C.** Effects of rock properties on specific cutting energy in linear cutting of sandstones by picks, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2006, Vol. 39, No. 2. — P. 89–120.
52. **Altindag R.** Estimation of penetration rate in percussive drilling by means of coarseness index and mean particle size, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2003, Vol. 36, No. 4. — P. 323–332.

Поступила в редакцию 15/II 2017