

ГОРНОЕ МАШИНОВЕДЕНИЕ

УДК 622.24.08

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ БУРИМОСТИ ОСАДОЧНЫХ ГОРНЫХ ПОРОД

Дж. А. Каяни, М. Х. Захур, М. З. Имад, А. Ш. Ахмед Шахид

*Инженерно-технологический университет,
E-mail: jehanzaibafat@gmail.com, г. Лахор, Пакистан*

Отмечена важность характеризующих эффективность бурения показателей: индексов скорости бурения DRI, износа коронки BWI и долговечности резца CLI. Дан обзор известных моделей прогнозирования буримости горных пород по индексу скорости бурения и указано на недостаточность изученности долговечности коронок с помощью индекса износа коронки. Экспериментально исследовано влияние различных геомеханических параметров горных пород на буримость и износ коронки. Получена отрицательная линейная корреляция индекса скорости бурения DRI и положительная линейная корреляция индекса износа коронки BWI со значениями почти всех рассмотренных геомеханических свойств пород за исключением пористости, с которой DRI имеет положительную корреляцию, а BWI — отрицательную. Разработаны статистические модели прогнозирования DRI и BWI (с $R^2 \geq 0.83$) методами простой и множественной статистической регрессии.

Скорость бурения, износ коронки, песчаник, известняк, коэффициент регрессии

DOI: 10.15372/FTPRPI20240511
EDN: DBHBFJ

Эффективность бурения углеводородных скважин и прокладки туннелей зависит от производительности бурового оборудования. Значительные затраты на реализацию подобных проектов требуют комплексной оценки параметров, отвечающих за эффективность технологического процесса. Повышение качества бурения способно снижать финансовые и временные затраты.

Породная формация и ее геомеханические свойства влияют на производительность буровой коронки [1]. При бурении ее корпус испытывает абразивное воздействие со стороны породы, а режущая поверхность — нагрузки сжатия, растяжения и сдвига [2]. В результате коронка изнашивается и на ней образуются задиры. Бурение изношенными и поврежденными коронками может привести к их полному отказу, требующему принудительное извлечение из скважины. При этом существенные затраты на ремонт и замену коронки негативно сказываются на скорости бурения [3, 4]. Прогнозирование износа бурового оборудования с учетом свойств горных пород необходимо для выбора наиболее подходящего оборудования на стадии проектирования [5].

В Норвежском университете науки и технологий (NTNU/SINTEF) для оценки эффективности бурения предложены следующие показатели, позволяющие количественно оценить параметры режущих элементов: скорость бурения (DRI); износ коронки (BWI); долговечность резца (CLI). Скорость бурения характеризует буримость породы с точки зрения сопротивления проникновению [6]. Параметры, влияющие на буримость, делятся на три группы: породные (тип породы, минеральный состав, связность частиц, пористость); показатели бурового оборудования (тип буровой установки, масса коронки и ее тип, скорость вращения); эксплуатационные (метод бурения, система обслуживания узлов и агрегатов, опыт оператора) [7].

Повышение скорости бурения и долговечности режущих элементов изучено в [8–16]. В [14, 16–20] для прогнозирования DRI используются следующие зависимости:

$$\text{DRI} = -0.264\text{UCS} + 87.049, \quad R^2 = 0.71,$$

$$\text{DRI} = -5.28726I_s + 86.297, \quad R^2 = 0.71,$$

$$\text{DRI} = -2.7987\text{BTS} + 85.674, \quad R^2 = 0.55,$$

$$\text{DRI} = -0.9832R_N + 118.430, \quad R^2 = 0.78,$$

$$\text{DRI} = 90.67e^{-0.005\text{UCS}}, \quad R^2 = 0.71,$$

$$\text{DRI} = 3.20\eta + 43.200, \quad R^2 = 0.38,$$

$$\text{DRI} = -0.92R_N + 89.550, \quad R^2 = 0.18,$$

$$\text{DRI} = -6.86V_p + 83.100, \quad R^2 = 0.40,$$

$$\text{DRI} = -1.5657R_N + 134.970, \quad R^2 = 0.98,$$

$$\text{DRI} = -0.1514\text{UCS} + 58.652, \quad R^2 = 0.91,$$

$$\text{DRI} = -0.3098\text{UCS} + 72.515, \quad R^2 = 0.83,$$

$$\text{DRI} = -4.1505I_s + 71.005, \quad R^2 = 0.84,$$

$$\text{DRI} = 9.2942\eta + 28.302, \quad R^2 = 0.72,$$

$$\text{DRI} = -1.2571R_N + 111.250, \quad R^2 = 0.73,$$

$$\text{DRI} = -2.5623\text{BTS} + 75.514, \quad R^2 = 0.76,$$

$$\text{DRI} = 145.70 - 1.35\text{UCS}, \quad R^2 = 0.85,$$

$$\text{DRI} = -19.40 + 3.02\text{UCS} - 0.029\text{UCS}^2, \quad R^2 = 0.83,$$

где UCS — прочность на одноосное сжатие; BTS — бразильская прочность на растяжение; I_s — индекс точечной нагрузки; η — пористость; R_N — величина отскока молотка Шмидта; R^2 — коэффициент корреляции.

Износ коронки (BWI) — косвенный показатель изнашивания рабочих поверхностей коронки. Он связан с механическим воздействием коронки на породу и движением относительно породы, является наиболее эффективным, так как определяет время и затраты относительно взрываемости в буровзрывных проектах [21, 22]. Прочность породы и наличие в ней абразивных минералов — основные факторы, влияющие на срок службы и производительность коронки [23]. Для большинства пород абразивность прямо пропорциональна износу, а износ обратно пропорционален буримости [22, 24]. В [23, 25, 26] износ режущих элементов детально изучен, однако не выявлены надежные корреляции для расчета BWI.

В данной работе рассмотрены зависимости показателей BWI и DRI от основных параметров породных формаций. Породы являются вмещающими для углеводородных месторождений и основными породами, в которых осуществляется прокладка туннелей. В текущий момент на стадии проектирования находится ряд проектов цементной, строительной и угледобывающей промышленности, планируемых к реализации в подобных породных формациях, поэтому прогнозирование скорости бурения и износа коронки крайне актуально.

Цель настоящей работы — разработка моделей прогноза износа коронки на основе свойств горной породы. Образцы осадочных пород взяты из провинции Пенджаб (Пакистан). Данные экспериментальных исследований использовались для анализа изменения BWI и DRI от прочности на одноосное сжатие, модуля Юнга E , коэффициента Пуассона ν , индекса точечной нагрузки I_s , отскока молотка Шмидта R_N , пористости η и абразивности A . Также для оценки BWI и DRI разработаны модели прогнозирования на основе метода статистической регрессии. Эти модели могут использоваться для быстрого расчета показателей буримости и износа коронки.

ЛАБОРАТОРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Из породных формаций отобрано 14 образцов (семь образцов песчаника из соляной шахты Хевра и семь образцов известняка из формации Саманасух). Также взяты контрольные образцы из отдаленных областей.

Лабораторные исследования включали определение геомеханических параметров породы, показателей буримости и износа коронки. Прочность на одноосное сжатие испытывалась на цилиндрических образцах объемом $\sim 0.03 \text{ м}^3$, которые предварительно обрезались, шлифовались в соответствии со стандартами [27]. С целью обеспечения точности для каждой формации испытано не менее семи образцов. Индекс точечной нагрузки I_s исследовался на керновых образцах с отношением длины к диаметру более 1 по стандарту [28]. На рис. 1 показаны образцы песчаника и известняка после разрушения. Модуль Юнга E и коэффициент Пуассона ν вычислялись по методике [27] с помощью датчика осевой и поперечной деформации, R_N — по [29] с помощью молотка Шмидта типа L с энергией удара 0.735 Нм, η — по [30] методом насыщения жидкостью. Показатель DRI оценивался на основе экспериментальных значений Сиверса (SJ) и хрупкости S_{20} [31–33], BWI получали пересечением определенных значений DRI и абразивности A [33]. Далее проводился статистический анализ результатов и предлагались значимые аналитические выражения, согласующиеся с предыдущими исследованиями.

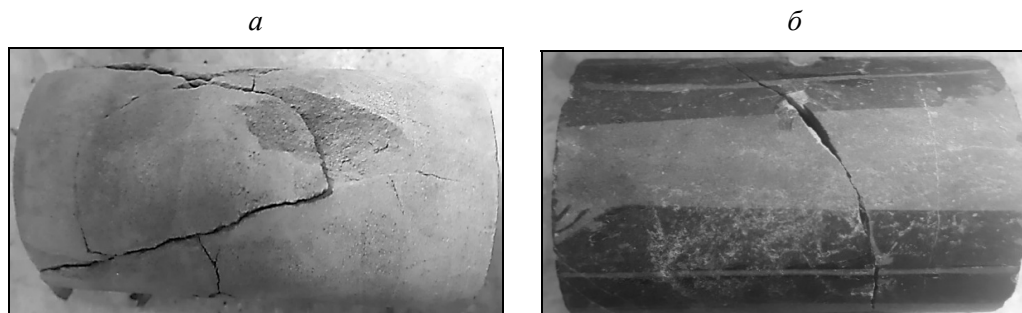


Рис. 1. Образцы песчаника (а) и известняка (б) после испытаний

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В табл. 1 представлены результаты экспериментальных исследований образцов песчаника и известняка.

ТАБЛИЦА 1. Физико-механические свойства образцов песчаника и известняка

Образец	UCS, МПа	I_s , МПа	R_N	E , ГПа	ν	η , %	S_{20} , %	SJ, 1/10 мм	A , мг	DRI	BWI
Песчаник 1	32.07	1.41	22	4.63	0.38	12.19	73.50	16.40	14	78	15
Песчаник 2	36.08	1.54	25	4.84	0.14	11.48	71.00	15.25	15	75	17
Песчаник 3	8.53	0.17	12	1.57	0.34	16.08	77.50	28.00	8	83	11
Песчаник 4	22.86	0.86	16	2.88	0.28	12.67	79.00	13.88	13	80	13
Песчаник 5	18.77	0.72	15	2.12	0.45	14.04	80.00	14.15	15	81	14
Песчаник 6	23.12	0.89	18	2.61	0.36	12.85	77.00	13.73	10	79	12
Песчаник 7	38.73	1.61	28	3.80	0.17	10.88	71.87	14.63	21	73	21
Известняк 1	32.76	3.09	15	7.97	0.13	2.08	58.95	8.73	5	57	22
Известняк 2	52.38	3.77	20	16.72	0.23	1.16	50.50	7.40	10	49	33
Известняк 3	54.68	3.94	24	20.19	0.28	1.14	49.92	5.98	13	48	37
Известняк 4	62.57	5.49	30	6.74	0.35	0.41	45.87	5.05	17	44	42
Известняк 5	66.11	4.80	32	13.15	0.19	0.22	45.65	4.98	26	41	49
Известняк 6	56.98	4.46	26	20.47	0.44	0.47	48.35	5.28	14	46	38
Известняк 7	44.53	3.60	18	11.75	0.31	1.36	54.92	8.53	9	56	31

На рис. 2 приведены соотношения между показателями DRI, BWI и геомеханическими свойствами рассматриваемых пород.

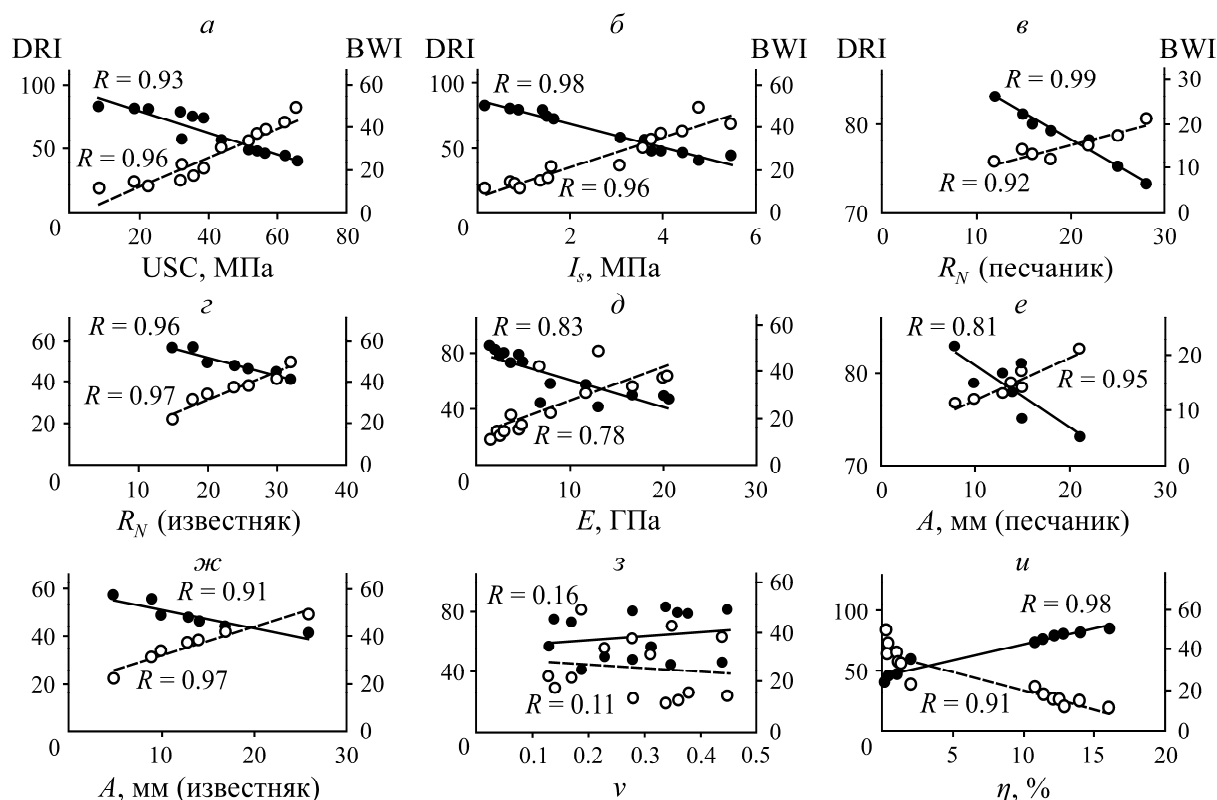


Рис. 2. Изменение скорости бурения DRI (●) и износа коронки BWI (○) в зависимости от физико-механических свойств пород: а — прочности на одноосное сжатие (UCS); б — индекса точечной нагрузки I_s ; в, г — величины отскока молотка Шмидта R_N для песчаника и известняка; д — модуля Юнга E ; е, ж — абразивности A для песчаника и известняка; з — коэффициента Пуассона ν ; и — пористости η

Установлены линейные корреляции между DRI и BWI и геомеханическими свойствами пород (рис. 2). Видно, что DRI с ростом UCS, I_s , R_N , E , A уменьшается, BWI линейно увеличивается. С другой стороны, при увеличении η DRI увеличивается, BWI линейно уменьшается. Это означает, что рассматриваемые свойства породы влияют на бурение. Изменение DRI относительно других параметров согласуется с [14, 16, 26, 35, 36]. Изменение BWI относительно других параметров согласуется лишь с [35, 36], в которых представлены скорость износа коронки и срок ее службы. Выявлено слабое соотношение между ν и DRI и BWI. Коэффициент Пуассона не подходит для прогнозирования буримости и износа коронки. Соотношения между R_N и DRI и BWI определялись отдельно для песчаника и известняка. На значение отскока молотка Шмидта влияет состояние поверхности образца. Кривые DRI и BWI относительно абразивности строились отдельно для песчаника и известняка из-за различий в минеральном составе, так как наличие кварца влияет на абразивность породы [22].

На основе полученных соотношений с помощью простой и множественной линейной регрессии разработаны статистические модели:

$$\text{DRI} = -0.86\text{UCS} + 97.060, \quad R^2 = 0.87, \quad (1)$$

$$\text{DRI} = -9.04I_s + 87.040, \quad R^2 = 0.97, \quad (2)$$

$$\text{DRI} = 2.51\eta + 46.240, \quad R^2 = 0.96, \quad (3)$$

$$\text{DRI} = -0.09\text{UCS} - 3.99I_s + 1.22\eta + 69, \quad R^2 = 0.99, \quad (4)$$

$$\text{BWI} = 0.70\text{UCS} - 1.800, \quad R^2 = 0.92, \quad (5)$$

$$\text{BWI} = 6.97I_s + 7.290, \quad R^2 = 0.93, \quad (6)$$

$$\text{BWI} = -1.84\eta + 38.060, \quad R^2 = 0.83, \quad (7)$$

$$\text{BWI} = 0.31\text{UCS} + 4.89I_s + 0.23\eta - 0.71, \quad R^2 = 0.95. \quad (8)$$

Коэффициенты R^2 моделей (1)–(8) лежат в диапазоне 0.83–0.99 при доверительном интервале $\Delta = 95\%$. Результаты прогнозирования множественной регрессии в большей степени согласуются с фактическими результатами. Проверка моделей приведена в табл. 2. При $\Delta = 95\%$ рассчитанный F -критерий ($F_{\text{расч}}$) превышает табличный ($F_{\text{табл}}$). Это означает, что предлагаемые модели статистически достоверны [16, 23].

ТАБЛИЦА 2. Проверка достоверности моделей (1)–(8) по F -критерию

Модель	$F_{\text{расч}}$	$F_{\text{табл}}$	$F_{\text{значимое}}$	Среднеквадратическая ошибка
(1)	76.03	4.75	0.00	6.19
(2)	357.32	4.75	0.00	3.02
(3)	282.53	4.75	0.00	3.38
(4)	175.86	3.71	0.00	2.51
(5)	128.78	4.75	0.00	3.86
(6)	147.06	4.75	0.00	3.63
(7)	58.00	4.75	0.00	5.48
(8)	58.08	3.71	0.00	3.38

В табл. 3 выполнена проверка моделей путем экспериментального определения лабораторных значений (lab) и значений, рассчитанных моделями (расч).

ТАБЛИЦА 3. Проверка предлагаемых моделей

Модель	Образец	DRI _{lab}	DRI _{расч}	Модель	Образец	BWI _{lab}	BWI _{расч}
(1)	Песчаник	78.64	79	(5)	Песчаник	13.19	13
	>>	80.44	82		>>	11.72	9
	Известняк	54.72	55		Известняк	32.66	29
	>>	49.83	50		>>	36.64	38
(2)	Песчаник	77.81	79	(6)	Песчаник	14.33	13
	>>	82.93	82		>>	10.43	9
	Известняк	49.2	52		Известняк	36.15	29
	>>	47.74	50		>>	37.26	38
(3)	Песчаник	80.98	79	(7)	Песчаник	12.59	13
	>>	82.84	82		>>	11.23	9
	Известняк	50.06	55		Известняк	35.26	29
	>>	48.15	50		>>	36.66	38
(4)	Песчаник	79.93	79	(8)	Песчаник	14.05	13
	>>	83.25	82		>>	10.83	9
	Известняк	49.9	55		Известняк	35.17	29
	>>	47.83	50		>>	37.52	38

На рис. 3 приведено сравнение рассчитанных и фактических значений DRI и BWI.

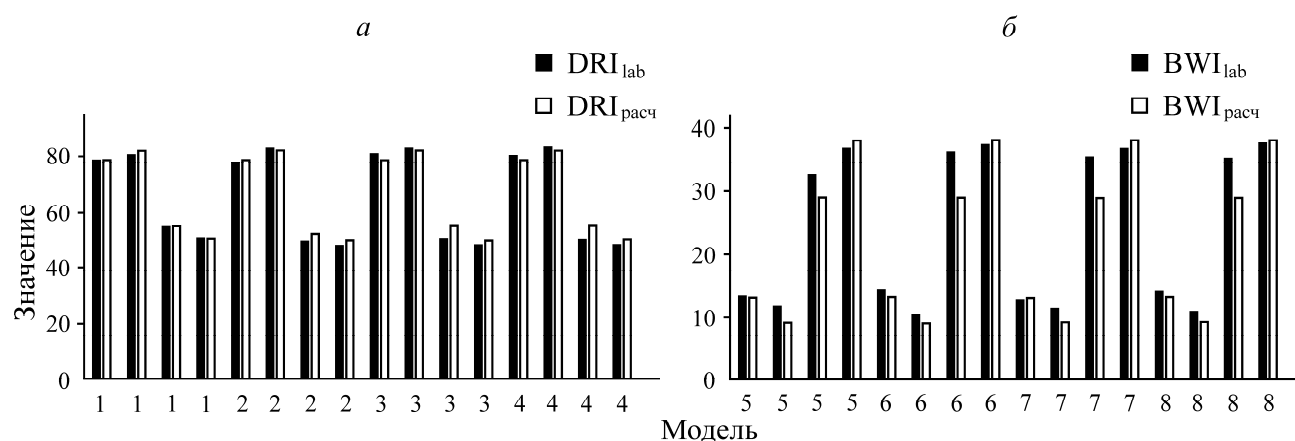


Рис. 3. Экспериментальная проверка моделей DRI (а) и BWI (б)

ВЫВОДЫ

Получена отрицательная линейная корреляция индекса скорости бурения DRI и положительная линейная корреляция индекса износа коронки BWI со значениями почти всех рассмотренных геомеханических свойств пород, за исключением пористости, с которой DRI имеет

положительную корреляцию, а BWI — отрицательную. Достоверность моделей прогнозирования индексов DRI и BWI, полученных методом простой и множественной линейной статистической регрессии, подтверждена достаточно высоким коэффициентом корреляции $R^2 > 0.83$ и F-критерием.

Дальнейшие исследования по данной теме могут включать изучение влияния минералогических и структурных характеристик породы на DRI и BWI, таких как полевошпатовый индекс, индекс окраски, эквивалентное содержание кварца и твердость по Виккерсу.

Авторы выражают благодарность доктору Ясиру Мажиду (Инженерно-технологический университет), Мансуру Икбалу (Инженерно-технологический университет), инженерам Кашифу Рамзану (Fauji Cement, Пакистан) и Салману Шаббиду (Shenkai Petroleum) за содействие в сборе образцов и за помощь в экспериментальных исследованиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Khorzoughi M. B. and Hall R.** Processing of measurement while drilling data for rock mass characterization, *Int. J. Min. Sci. Technol.*, 2016, Vol. 26, No. 6. — P. 989–994.
2. **Yasar S., Capik M., and Yilmaz A. O.** Cuttability assessment using the drilling rate index, *Bul. Eng. Geol. Env.*, 2015, Vol. 74, No. 4. — P. 1349–1361.
3. **Fowell R. and Abu Bakar M.** A review of the Cerchar and LCPC rock abrasivity measurement methods, *Proc. 11th Congress Int. Soc. Rock Mech.*, 2007.
4. **Plinninger R. J.** Abrasiveness assessment for hard rock drilling, *Geomech. Tunnelbau*, 2008, Vol. 1, No. 1. — P. 38–46.
5. **Ataei M., KaKaie R., Ghavidel M., and Saeidi O.** Drilling rate prediction of an open pit mine using the rock mass drillability index, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 2014, Vol. 73. — P. 130–138.
6. **Moein M. J. A., Shaabani E., and Rezaeian M.** Experimental evaluation of hardness models by drillability tests for carbonate rocks, *J. Petrol. Sci. Eng.*, 2014, Vol. 113. — P. 104–108.
7. **Bilgin N., Copur H., and Balci C.** Mechanical excavation in mining and civil industries, CRC press, 2013.
8. **Gao Li, Mou Yang, Yingfeng Meng, Houbin Liu, Lin Han, Feng Zhou, and Hua Zhang.** The assessment of correlation between rock drillability and mechanical properties in the laboratory and in the field under different pressure conditions, *J. Natural Gas Sci. Eng.*, 2016, Vol. 30. — P. 405–413.
9. **Bruland A., Dahl T., and Nilsen B.** Tunnelling performance estimation based on drillability testing, 8th ISRM Congress, *Int. Soc. Rock Mech. Rock Eng.*, 1995.
10. **Thuro K. and Spaun G.** Drillability in hard rock drill and blast tunneling, *Felsbau*, 1996, Vol. 14, No. 2. — P. 1–11.
11. **Dahl F., Bruland A., Groev E., and Nilsen B.** Trademarking the NTNU/SINTEF drillability test indices, *Tunnels Tunn. Int.*, 2010. — P. 44–46.
12. **Yarali O. and Kahraman S.** The drillability assessment of rocks using the different brittleness values, *Tunnel. Underground Space Technol.*, 2011, Vol. 26, No. 2. — P. 406–414.

13. **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, *Tunnel. Underground Space Technol.*, 2011, Vol. 28, No. 1. — P. 150–158.
14. **Yarali O. and Soyer E.** Assessment of relationships between drilling rate index and mechanical properties of rocks, *Tunnel. Underground Space Technol.*, 2013, Vol. 33. — P. 46–53.
15. **Çapik M., Yılmaz A. O., Yaşar S., Yarali O., and Cavusoglu I.** Comparison of drillability and abrasivity properties of rocks, 23rd Int. Min. Congr. Exhib. Turkey (IMCET 2013), 2013. — P. 16–19.
16. **Capik M., Yilmaz A. O., and Yasar S.** Relationships between the drilling rate index and physicommechanical rock properties, *Bul. Eng. Geol. Env.*, 2017, Vol. 76, No. 1. — P. 253–261.
17. **Shafique U. and Bakar M. A.** Evaluation of relationships between drilling rate index and physical and strength properties of selected rock units of Pakistan, *Nucleus*, 2015, Vol. 52, No. 2. — P. 79–84.
18. **Yetkin M. E., Özfırat M. K., Yenice H., Şimşir F., and Kahraman B.** Examining the relation between rock mass cuttability index and rock drilling properties, *J. African Earth Sci.*, 2016, Vol. 124. — P. 151–158.
19. **Iqbal M. M. and Bakar Z. A.** Drillability evaluation of limestone rock quarries in Punjab and Khyber Pakhtunkhwa, Pakistan, *Pakistan J. Eng. Applied Sci.*, 2016.
20. **Yenice H., Özdoğan M. V., and Özfırat M. K.** A sampling study on rock properties affecting drilling rate index, *J. African Earth Sci.*, 2018, Vol. 141. — P. 1–8.
21. **Plinninger R. J., Spaun G., and Thuro K.** Predicting tool wear in drill and blast, *Tunnels Tunnel. Int. Magazine*, 2002. — P. 1–5.
22. **Aligholi S., Lashkaripour G. R., Ghafoori M., and Azali S. T.** Evaluating the relationships between NTNU/SINTEF drillability indices with index properties and petrographic data of hard igneous rocks, *Rock Mech. Rock Eng.*, 2017, Vol. 50, No. 11. — P. 2929–2953.
23. **Capik M. and Yilmaz A. O.** Correlation between Cerchar abrasivity index, rock properties, and drill bit lifetime, *Arabian J. Geosciences*, 2017, Vol. 10, No. 1. — P. 15.
24. **Rostami J. I., Ghasemi A., Gharahbagh E. A., Dogruoz C., and Dahl F.** Study of dominant factors affecting Cerchar abrasivity index, *Rock Mech. Rock Eng.*, 2013, Vol. 47, No. 5. — P. 1905–1919.
25. **Yasar S. and Yilmaz A.** Tool wear prediction with different models for medium strength rocks, 2016.
26. **Majeed Y., Bakar M. A., and Butt I.** Abrasivity evaluation for wear prediction of button drill bits using geotechnical rock properties, *Bul. Eng. Geol. Env.*, 2020, Vol. 79, No. 2. — P. 767–787.
27. **ASTM-D7012.** Standard test methods for compressive strength and elastic moduli of intact rock core specimens under varying states of stress and temperatures, ASTM Int., West Conshohocken, PA, 2014.
28. **ASTM-D5731.** Standard test method for determination of the point load strength index of rock and application to rock strength classifications, ASTM Int., West Conshohocken, PA, 2016.
29. **ASTM-D5873-00.** Standard test method for determination of rock hardness by rebound hammer method, ASTM Int., West Conshohocken, PA, 2004.
30. **ISRM.** Suggested methods for determining water content, porosity, density, absorption and related properties and swelling and slake-durability index, *Int. Society Rock Mech.*, 1979.
31. **Zare S. and Bruland A.** Applications of NTNU/SINTEF drillability indices in hard rock tunneling, *Rock Mech. Rock Eng.*, 2013, Vol. 46, No. 1. — P. 179–187.

32. **Dahl F.** DRI, BWI, CLI standards, NTNU, Trondheim., 2003. — P. 1 – 20.
33. **NTNU.** Hard rock tunnel boring, Norwegian University of Science and Technology, 1B-98, 1998.
34. **Bruland A.** Hard rock tunnel boring: Drillability test methods, Project report 13A-98, NTNU Trondheim, 1998. — 21 p.
35. **Adebayo B. and Akande J.** Analysis of button bit wear and performance of down-the-hole hammer drill, Ghana Min. J., 2015, Vol. 15, No. 2. — P. 36–41.
36. **Thuro K.** Drillability prediction: geological influences in hard rock drill and blast tunneling, Geologische Rundschau, 1997, Vol. 86, No. 2. — P. 426–438.
37. **Nangolo C. and Musingwini C.** Empirical correlation of mineral commodity prices with exchange-traded mining stock prices, J. Southern African Institute Min. Metal., 2011, Vol. 111, No. 7. — P. 459–468.

Поступила в редакцию 25/V 2021

После доработки 24/VIII 2023

Принята к публикации 24/IX 2024