

# ВЗАИМОСВЯЗЬ ПОКАЗАТЕЛЕЙ АБРАЗИВНОСТИ СКАЛЬНЫХ ГРУНТОВ ТОННЕЛЬНОЙ ПРОХОДКИ ПО МЕТОДАМ ВРАЩАЮЩИХСЯ ЭТАЛОНОВ ПОЛОГО СТЕРЖНЯ И КРЫЛЬЧАТКИ

С. В. Мазеин<sup>1</sup>, В. В. Прищепов<sup>1</sup>, А. С. Вознесенский<sup>1</sup>, Я. О. Куткин<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Университет науки и технологий МИСИС, Москва, Россия

**Аннотация:** В качестве образцов для испытаний были использованы скальные грунты с мест проходки тоннелей тоннелепроходческими механизированными комплексами: известняки со станции метро «Суворовская» и доломиты со станции «Рижская» Большой кольцевой линии Москвы. Для оценки прочности образцов проводились испытания по определению предела прочности при сжатии и при растяжении по бразильской схеме. Для оценки абразивности была использована установка в варианте с вращающимся полым стержнем по методу Л. И. Барона – А. В. Кузнецова (коэффициент  $K_a$ ). После переоснащения она же использовалась для оценки абразивности скальных и дисперсных грунтов по методу с вращающейся крыльчаткой, разработанному в лаборатории Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Франция, сокращенно LCPC (коэффициент LAC). Получены уравнения связи LAC с пределом прочности скальных грунтов при сжатии и растяжении, со средним размером куска, а также с коэффициентом Ка. Такие уравнения могут быть использованы в приложениях для оперативного контроля абразивности скальных и дисперсных грунтов, а также для прогноза износа режущего инструмента с целью его своевременной замены при проходке тоннелей с помощью тоннелепроходческих механизированных комплексов, бурении скважин и для других задач.

**Ключевые слова:** грунты, скальные, абразивность, методы, полый стержень, крыльчатка, уравнения, прочность, размер куска, износ, режущий инструмент.

**Для цитирования:** Мазеин С. В., Прищепов В. В., Вознесенский А. С., Куткин Я. О. Взаимосвязь показателей абразивности скальных грунтов тоннельной проходки по методам вращающихся эталонов полого стержня и крыльчатки // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2024. – № 11–1. – С. 116–128. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2024\_111\_0\_116.

## Correlation of Abrasiveness Parameters of Tunnel Excavation Rock Soils Using Rotating Hollow Rod and Impeller Standards

S. V. Mazein<sup>1</sup>, V. V. Prishchepov<sup>1</sup>, A. S. Voznesenskii<sup>1</sup>, Ya. O. Kutkin<sup>1</sup>

<sup>1</sup> MISIS University of Science and Technology, Moscow, Russia

**Abstract:** Rocky soils from tunnel excavation sites using tunnel boring machines were used as test samples: limestones from the Suvorovskaya metro station and dolomites from the Rizhskaya station of the Moscow Big Circle Line. To assess the strength of the samples, tests were conducted to determine the ultimate compressive strength and tensile strength using the

Brazilian scheme. To assess the abrasiveness, a setup with a rotating hollow rod by L. I. Baro n – A. V. Kuznetsov method (coefficient  $K_a$ ) had been used. After re-equipment, it also had been used to assess the abrasiveness of rocky and dispersed soils using the rotating impeller method. I had been developed in the Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, France, abbreviated LCPC (coefficient LAC). Equations had been obtained for the correlation of LAC with the ultimate strength of rocky soils under compression and tension, with the average size of a piece, and with the coefficient  $K_a$ . Such equations can be used for operational control of the abrasiveness of rocky and dispersed soils, as well as for predicting the wear of cutting tools for their timely replacement during tunneling using tunnel boring machines, drilling boreholes and in other applications.

**Key words:** soils, rocky soil, abrasiveness, methods, hollow rod, impeller, equations, strength, piece size, wear, cutting tool.

**For citation:** Mazein S. V., Prishchepov V. V., Voznesenskii A. S., Kutkin Ya. O. Correlation of Abrasiveness Parameters of Tunnel Excavation Rock Soils Using Rotating Hollow Rod and Impeller Standards. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2024;(11-1):116–128. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2024\_111\_0\_116.

---

## 1. Введение

Развитие транспортной сети способствует резкому увеличению строительства тоннелей с использованием тоннелепроходческих механизированных комплексов (ТПМК). Изнашивание их режущих элементов в большой степени определяется средой, в которой ведутся работы, а именно — скальными и дисперсными грунтами, среди свойств которых в данном случае наибольшее значение имеет абразивность. Она влияет на износ инструмента, потребление энергии, время строительства и является важным параметром в горной и строительной инженерии [1].

Несмотря на то, что в нашей стране вопрос об оценке абразивности ставится уже не один десяток лет, проведены научно-исследовательские работы, результаты которых заняли значимое место в мировой практике, многие вопросы еще не решены. Так, например, для оценки дробимости существуют российские стандарты для щебня и гравия, как, например, ГОСТ 8267–93, но отсутствуют стандарты по абразивности для пород, в которых происходит проходка с помощью ТПМК. В подтверждение важности

исследования влияния абразивности на износ режущего инструмента ТПМК можно привести работу [2].

Разработка методов оценки абразивности скальных и дисперсных грунтов, как важная часть горной и строительной инженерии, интенсивно ведется за рубежом [3, 4]. Оценка влияния грунтов и горных пород на инструменты режущего органа ТПМК позволяет уменьшить количество и время простоев комплекса, снизить риск возникновения аварийных ситуаций, что позволяет обеспечить планирование и оптимизацию проходки тоннелей [5–7].

Применительно к метрополитенам, впервые требования по определению абразивности грунтов при проведении инженерно-геологических изысканий были введены в СП 32–105–2004, однако цель и область использования этой характеристики не были указаны.

Отечественными учеными [8] ставился вопрос о необходимости разработки государственного стандарта и других нормативных документов по оценке абразивности горных пород и грунтов с целью прогнозирования износа режущего инструмента роторов ТПМК.

В [9] представлены методики и графоаналитические зависимости по оптимизации оснащения роторов и периодичности замены режущего инструмента щитовых комплексов, разработанные на основе исследований и анализа статистических данных строительства крупных тоннелей в Москве. В [10] показано, что существует прямая зависимость между эффективностью механизированной выемки в твердых породах и эффективностью дисковых шарошек. В [11] отмечено, что частая замена режущего инструмента ТПМК оказывает серьезное негативное влияние на сроки строительства, стоимость и безопасность тоннельных проектов. В [6] говорится, что при ведении процессов бурения горных пород или проходке тоннелей в грунтах экономические показатели прямо зависят от износа и определения расхода режущего инструмента.

Для оценки абразивности разработан ряд методов, используемых в зависимости от конкретных условий проходки и типа грунта.

Один из таких методов, первоначально предложенный М. И. Койфманом [12], был затем усовершенствован Л. И. Бароном и А. В. Кузнецовым [13] и назван в их честь. Согласно этому методу, определение абразивности скального грунта производят «сверлением» образца предварительно взвешенным эталонным полым стержнем. Потеря массы эталонного стержня в мг за время проведения опыта (10 мин) принимается в качестве показателя абразивности испытываемой породы  $K_a$ .

В [14] описаны наиболее известные комплексы испытаний по определению абразивности, результаты которых используются для оценки абразивности грунтов, износа инструмента не только при проходке ТПМК, но и при бурении горных пород и в других областях.

Тест CERCHAR (стандарт Франции NF P 94-430-1) был разработан Исследовательским центром «Уголь Франции» (Centre d'Etudes et de Recherches des Charbonnages de France), по этому стандарту разработаны американский стандарт ASTM D7625-22 и его более ранняя версия D7625-10. Тест CERCHAR (Cerchar Abrasivity Index, CAI) рекомендован Международным обществом геомехаников ISRM [15]. Он предназначен для определения абразивности скальных грунтов и основан на царапании заостренными штифтами поверхностей образцов на длине 10 мм. Значение индекса абразивности CAI определяется величиной стертой части острия штифтов.

В зарубежных исследованиях [16] метод CERCHAR активно применяется и изучается индекс CAI для пород с различной абразивностью в зависимости от скорости перемещения штифта, что может влиять на износ режущего инструмента ТПМК.

Тест LCPC разработан во Франции в лаборатории Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC) и описан во французском стандарте NF P18-579, впервые опубликованном в 1990 г., затем переизданном в 2013 г. во Франции, а также в переводе на немецкий язык в Германии. Установка для испытаний, названная «Абразиметр», оснащена двигателем мощностью 750 Вт, приводящим в движение металлическую крыльчатку с твердостью по Роквеллу HRB 60-75, вращающуюся в цилиндрическом сосуде. Перед испытанием образцы скального грунта должны быть измельчены до размера от 4 до 6,3 мм. Коэффициент абразивности LCPC (LCPC-Abrasivity-Coefficient, или сокращенно LAC) рассчитывается как потеря веса крыльчатки за время дробления 5 мин, деленная на массу образца (500 г).

Одним из подходов к измерению абразивности грунта является тест NTNU/SINTEF Soil Abrasion Test (SAT), принцип которого описан в [7]. Он основан на измерении потери веса стального образца при транспортировке грунта на вращающемся диске. Значение коэффициента SAT рассчитывается как среднее значение измеренной потери веса стального долота в миллиграммах после тестирования. Некоторые исследования по применению данного метода представлены в [17].

Целью настоящей работы является отработка методики определения абразивности скальных грунтов методом Л. И. Барона и А. В. Кузнецова, который также используется и в зарубежной практике [18], и методом LCPC [19], установление связей между свойствами  $K_a$  и LAC с пределами прочности при сжатии и растяжении, со средним размером исходных кусков, а также построение зависимости между показателем абразивности LAC и коэффициентом абразивности  $K_a$ .

## 2. Материалы и методы

### 2.1. Образцы горных пород

Планы работ предусматривали отбор проб, определение пределов прочности при сжатии и растяжении, испытания на абразивность по методикам Л. И. Барона и А. В. Кузнецова, а также LCPC, определение взаимосвязей между показателями прочности и абразивности, определенными разными методами.

Эксперименты проводились на образцах скальных грунтов по терминологии в соответствии с ГОСТ 25100–2020. Отбор и подготовка образцов скальных горных пород для испытаний на прочность осуществлялись по ГОСТ 21153.0–75. Для изготовления образцов были извлечены штупы из двух мест

проходки ТПКМ: известняки на станции метро «Суворовская» и доломиты на станции «Рижская» Большой кольцевой линии (БКЛ). Из них для испытаний при сжатии было изготовлено по 6 образцов-призм размером  $40 \times 40 \times 40$  мм  $\pm 2$  мм. Для определения предела прочности при растяжении по бразильской схеме изготавливалось по 6 цилиндрических образцов  $\varnothing 40 \times 40 \pm 2$  мм.

Для определенности обозначения имели букву R (лат.) или P (русс.) для известняка со станции «Рижская» и букву S (лат.) или C (русс.) для доломита со станции «Суворовская». В обозначениях использовались также цифры, первая из которых, 0, обозначала испытания при растяжении, а цифра 1 — при сжатии. Вторая цифра обозначала номер образца.

Образцы испытывались на универсальной испытательной машине Instron 150LX по ГОСТ 30629–2011 при определении предела прочности при сжатии и по ГОСТ 21153.3–1985 при растяжении. Результаты определения средних значений пределов прочности при сжатии и растяжении приведены в табл. 1.

Можно сделать вывод, что коэффициенты вариации для доломита из-за его значительной пористости больше в 2–3 раза этих значений для известняка.

### 2.2. Оборудование и методики испытаний

Для определения абразивности скальных и дисперсных грунтов использовалась специальная установка на базе сверлильного станка, разработанная на кафедре физических процессов горного производства и геоконтроля НИТУ МИСИС в 2022–2023 гг. Данная установка в одном варианте использовалась для определения абразивности скальных горных пород

Таблица 1

**Прочностные свойства известняков и доломитов**  
**Strength properties of limestones and dolomites**

Место отбора, станция метро	Скальный грунт	Предел прочности при сжатии			Предел прочности при растяжении, МПа		
		Среднее, МПа	С.к.о., МПа	К-т вариации	Среднее, МПа	С.к.о. МПа	К-т вариации
«Рижская»	Известняк	16,25	2,41	0,148	2,7	0,29	0,107
«Суворовская»	Доломит	74,14	20,54	0,277	8,38	3,05	0,360

по методу Л. И. Барона — А. В. Кузнецова, а в другом, после переоснащения, — для определения как абразивности скальных и дисперсных грунтов, так и скорости износа режущего инструмента по методу LCPC.

В варианте метода Л. И. Барона — А. В. Кузнецова внешний вид установки представлен на рис. 1, а. Установка содержит сверлильный станок 1, электромотор 2, вариатор 3 для регулировки скорости вращения шпинделя станка, эталонный стержень из стали У8а 4, балансир 5 с грузом для создания заданного усилия вертикальной нагрузки на испытательный стержень, испытываемый образец в тисках 6.

В варианте метода LCPC установка показана на рис. 1, б. Помимо общих элементов (1–3), указанных на рис. 1, а, вместо испытательного стержня и балансира здесь использована крыльчатка 7 из стали с твердостью HRB в диапазоне 60–75 и стальной сосуд 8 для пробы. К компьютеру подключены датчики тока, питающие двигатель, и датчик непрерывной акустической эмиссии [20], позволяющие записывать режимы испытаний. Эти элементы отдельно не отмечены, чтобы не перегружать рисунки и текст.

Испытания по методу Л. И. Барона — А. В. Кузнецова производились на обрезках штуфов, оставшихся при подготовке образцов скальных

пород для определения прочности. Образец нагружался осевым усилием 150 Н при скорости вращения 400 об/мин. Определение абразивности породы производилось «сверлением» образца породы предварительно взвешенным эталонным стержнем в течение 10 мин одним торцом стержня, а затем в течение также 10 мин — другим. Абразивность в миллиграммах определялась как полусумма потери веса эталонного стержня за оба «сверления».

Для испытаний по методу LCPC обрезки штуфов дробились, и с помощью ситового анализа выделялась фракция с размерами от 6,3 до 4,0 мм. Перед основным испытанием измерялся вес крыльчатки размером 25×50 мм и толщиной 5 мм из стали марки 20 твердостью HRB 67. После включения испытательной установки дробленая проба засыпалась в сосуд, в котором производилось дальнейшее измельчение пробы в течение 5 мин с помощью вращающейся крыльчатки и повторное взвешивание пробы. Вращение крыльчатки осуществлялось со скоростью 4500 об/мин.

Коэффициент абразивности по методике LCPC (LCPC–Abrasive–Coefficient, или сокращенно LAC) рассчитывался как потеря веса крыльчатки за время дробления 5 мин, деленная на вес пробы (500 г) по формуле

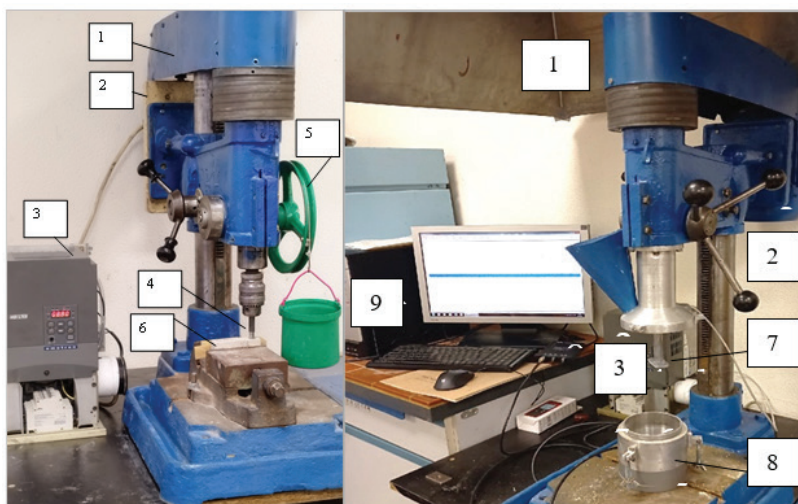


Рис. 1. Два варианта лабораторной установки для исследования абразивности скальных грунтов – по методу Л. И. Барона – А. В. Кузнецова (а) и LCPC (б): 1 – сверлильный станок; 2 – электромотор; 3 – вариатор; 4 – эталонный стержень; 5 – балансир с грузом для создания заданного усилия вертикальной нагрузки; 6 – испытываемый образец в тисках; 7 – крыльчатка; 8 – сосуд для пробы; 9 – компьютер

Fig. 1. Two versions of a laboratory setup for studying the abrasiveness of rocky soils using the method of L. I. Baron – A. V. Kuznetsov (a) and LCPC (b): 1 – drilling machine; 2 – electric motor; 3 – variator; 4 – standard rod; 5 – balancer with weight to create a given vertical load force; 6 – test sample in a vice; 7 – impeller; 8 – sample vessel; 9 – PC

$$LAC = \frac{m_0 - m}{M}, \quad (1)$$

где  $LAC$  – коэффициент абразивности по LCPC (г/т);  $m_0$  – вес крыльчатки до испытания (г);  $m$  – вес крыльчатки после испытания (г);  $M$  – вес пробы (0,0005 т).

### 3. Результаты испытаний

По методу Л. И. Барона – А. В. Кузнецова было испытано по 3 образца, на каждом образце произведено по 5 двойных измерений, всего 15 измерений. Усредненные результаты испытаний представлены в табл. 2.

По методу LCPC было испытано по 6 проб известняка и доломита. Усредненные результаты испытаний представлены в табл. 3.

## 4. Обсуждение результатов

### 4.1. Сравнение абразивных свойств известняка и доломита по коэффициенту $K_{аб}$

В табл. 2 представлены результаты испытаний абразивности известняка и доломита соответственно. Численные значения коэффициента абразивности  $K_{аб}$  доломита почти в два раза выше  $K_{аб}$  для известняка. Следует отметить, что оба скальных грунта обладают невысокой абразивностью. В таблицах приведена также оценка верхнего допуска  $M_в$ , который вычислялся как  $M_в = M_0 + 3s$ , где  $M_0$  – среднее значение потери веса;  $s$  – среднеквадратическое отклонение потери веса.  $M_в$  характеризует возможный переход в более высокий класс абразивности по классификации Л. И. Барона и А. В. Кузне-



Таблица 2

Результаты испытаний коэффициента абразивности Каб по методу Л. И. Барона – А. В. Кузнецова  
Results of tests of the abrasiveness coefficient Kab according to the method of L. I. Baron – A. V. Kuznetsov

Скальный грунт	Среднее, мг	СКО, мг	$K_v$	Верхний допуск $M_{в}$ , мг	Плотность, кг/м <sup>3</sup>
Известняк	1,13	0,42	0,37	2,39	2,27
Доломит	2,13	0,70	0,33	4,22	2,75

Таблица 3

Коэффициент абразивности LAC  
Abrasive coefficient LAC

Скальный грунт	Среднее, г/т	СКО, г/т	$K_v$
Доломит	46,5	20,58	0,443
Известняк	20,17	10,63	0,527

цова. Как следует из представленных результатов, даже при оценке по верхнему допуску исследованные скальные грунты не выходят за пределы I, самого низшего класса абразивности, т. е. обладают наименьшей абразивностью. Следующий II класс абразивности начинается с 6 мг.

#### 4.2. Особенности взаимосвязей показателя LAC с другими свойствами скальных грунтов

Полученная нами зависимость LAC от предела прочности при сжатии  $\sigma_{UCS}$  (UCS, uniaxial compressive strength) для известняка и доломита представлена на рис. 2.

Зависимость показателя LAC описывается формулой  $LAC = 16,43 + 0,59\sigma_{UCS}$  [г/т] при коэффициенте детерминации  $R^2 = 0,94$ .

Аналогичная зависимость LAC от предела прочности при растяжении  $\sigma_{UTS}$  (UTS, uniaxial tensile strength) для известняка и доломита аппроксимируется формулой  $LAC(\sigma_{UTS}) = 6,91 + 6,22 \sigma_{UTS}$  при коэффициенте детерминации  $R^2 = 0,97$ .

Данные связи демонстрируют прямые пропорциональные зависимости

LAC от прочности известняка и доломита, причем с пределом прочности на растяжение наблюдается более сильная взаимосвязь LAC и  $\sigma_{UTS}$  ( $R^2 = 0,97$ ). Это дает возможность прогноза абразивности данных типов пород по их прочностным показателям.

На рис. 3 представлены полученные нами зависимости LAC от среднего размера  $D$  кусков известняка и доломита в исходной пробе.

График на рис. 3 применительно к доломиту показывает, что при увеличении среднего размера исходного куска с 3,2 мм до 5,1 мм показатель абразивности LAC повышается в 2,5 раза. Этот график применительно к известняку показывает, что при увеличении среднего размера исходного куска с 3,2 мм до 4,8 мм показатель абразивности LAC повышается в 2,6 раза.

В заключение анализа результатов испытаний скальных грунтов по данным таблиц 1 и 2 строим зависимость показателя абразивности LAC от коэффициента абразивности  $K_a$  (рис. 4).

С достаточной точностью ( $R^2 = 0,9$  для зависимости, построенной по 4 парным опытам) можно в пределах

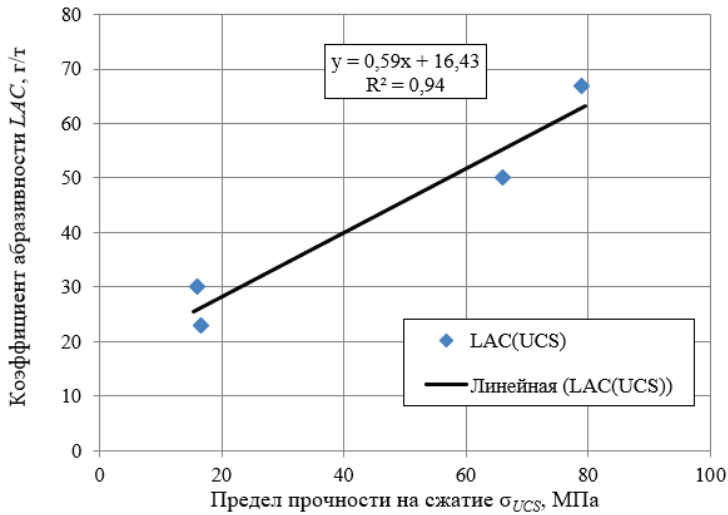


Рис. 2. Зависимость LAC от предела прочности при сжатии  $\sigma_{UCS}$  для известняка и доломита  
 Fig. 2. Dependence of LAC on the compressive strength  $\sigma_{UCS}$  for limestone and dolomite

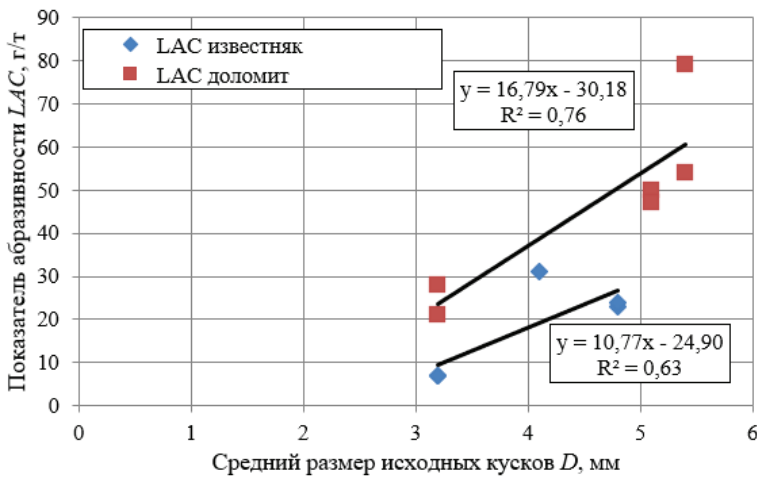


Рис. 3. Зависимость LAC от среднего размера D исходных кусков известняка и доломита  
 Fig. 3. Dependence of LAC on the average size D of the original pieces of limestone and dolomite

LAC = 2... 70 г/т представить следующее выражение для функции:

$$LAC = 40,1K_a - 10,6 \text{ [г/т]}. \quad (2)$$

Нижний предел диктуется погрешностью весового измерения, а верхний — проведенными испытаниями весьма малоабразивных грунтов. Для дальнейшего продолжения и уточнения

полученной зависимости необходимы испытания более абразивных скальных грунтов.

## 5. Выводы

Испытания на абразивность показали, что коэффициенты абразивности доломита больше, чем для известняка, что может свидетельствовать о более



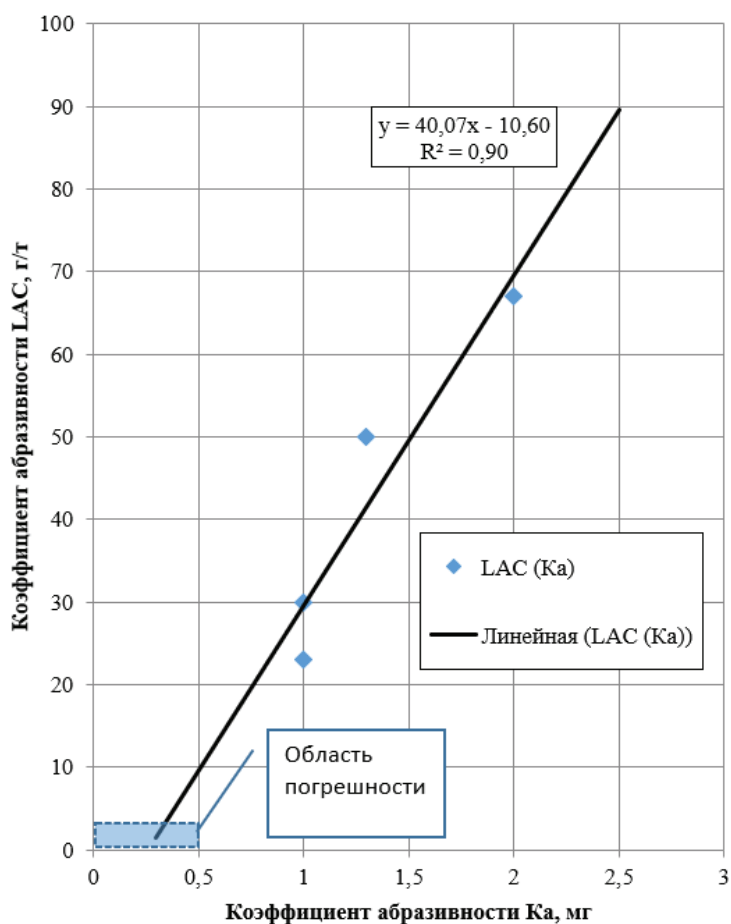


Рис. 4. Зависимость LAC от Ka  
 Fig. 4. Dependence of LAC on Ka

выраженных абразивных свойствах доломитовых пород. Тем не менее, стоит отметить, что в целом оба вида образцов обладают невысокой абразивностью. На основании проведенных испытаний были количественно оценены прочностные характеристики и абразивные свойства известняков и доломитов с мест проходки тоннелей Московского метрополитена. В результате построения зависимостей выявлена тесная прямо пропорциональная связь между показателями абразивности и прочностными свойствами. Также установлено, что абразивность

горных пород растет с увеличением размера куска.


Результаты могут быть использованы на практике, в частности, для оперативного контроля абразивности горных пород и грунтов и износа режущего инструмента с целью его своевременной замены при проходке тоннелей с помощью ТПМК.

## 6. Благодарности

Авторы выражают благодарность П. И. Дубинину, В. В. Корякину за помощь при конструировании экспериментальной установки, а также при подготовке и проведении экспериментов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Zhang G., Konietzky H. Cerchar Abrasion Ratio (CAR) as a New Indicator for Assessing Rock Abrasivity, Rock–Stylus Interaction and Cutting Efficiency // *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2020, vol. 53, pp. 3363–3371. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00603-020-02112-4>.
2. Мазеин С. В., Вознесенский А. С., Прищепов В. В. Методы определения абразивности твердых горных пород при механизированной проходке протяженных тоннелей // *Геотехника*. – 2022. – Т. 14. – № 3.– С. 44–55. DOI: <https://doi.org/10.25296/2221-5514-2022-14-3-44-54>.
3. Guangzhe Kurosch Thuro, Heinz Konietzky, Florian M. Menschik, Heiko Käsling, Michael Bayerl. In-situ investigation of drilling performance and bit wear on an electrical drill hammer // *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2022, vol. 122, 104348. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tust.2021.104348>.
4. Abu Bakar M. Z., Majeed Y. Dependence of Drillability Parameters on Engineering Properties of Selected Rocks from Pakistan // *Journal of Mining Science*. 2024, vol. 60, pp. 87–101. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1062739124010101>.
5. Ghodrat Barzegari, Ali Uromeihy, Jian Zhao. Parametric study of soil abrasivity for predicting wear issue in TBM tunneling projects // *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2015, vol. 48, pp. 43–57. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tust.2014.10.010>.
6. Jakobsen P. D., Bruland A., Dahl F. Review and assessment of the NTNU / SINTEF Soil Abrasion Test (SAT™) for determination of abrasiveness of soil and soft ground // *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2013, vol. 37, pp. 107–114. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tust.2013.04.003>.
7. Hashemnejad A., Hassanpour J. Proposed soil classification based on the experiences of soft-ground tunneling in Iran // *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. 2017, vol. 76, pp. 731–750. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10064-016-0868-4>.
8. Zhabin A. B., Polyakov A. V., Averin E. A. Of the need to introduce a state standard for determination of rock abrasiveness // *Ugol’*. 2018, no. 11, pp. 86–91. DOI: <http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2018-11-86-91>.
9. Мазеин С. В. Оптимизация оснащения ротора и периодичности замены режущего инструмента при щитовой проходке тоннельных и других горных выработок // *Горный журнал*. – 2009. – № 10. – С. 84–86.
10. Masood Zahiri Galeshi, Kamran Goshtasbi, Jafar Khademi Hamidi, Kaveh Ahangari. Numerical Investigation of Effect of Rock Bolt Angle on Shear Behavior of Rock Bridges // *Journal of Mining and Environment*. 2020, vol. 11, no. 4, pp. 1095–1113. DOI: <https://doi.org/10.22044/jme.2020.9933.1922>.
11. Duan Wenjun, Zhang Mengqi, Gou Bin, Mo Jiliang, Zhou Zhongrong. Influence of Cross-Section Profile on Wear Behavior of TBM Cutters in Hard Rock Stratum // *Tribology*. 2023, vol. 43, no. 7, pp. 738–749. DOI: [10.16078/j.tribology.2022102](https://doi.org/10.16078/j.tribology.2022102).
12. Койфман М. И. Абразивные свойства минеральных частиц. – М: Тип. им. К. Маркса, 1932. – 64 с.
13. Барон Л. И., Кузнецов А. В. Абразивность горных пород при добычании. – М.: Издательство АН СССР, 1961. – 167 с.
14. Käsling H., Thuro K. Determining rock abrasivity in the laboratory // *Rock Mechanics in Civil and Environmental Engineering – Proceedings of the European Rock Mechanics Symposium, EUROCK 2010*. 2010, pp. 425–428.

15. Alber M., Yarali O., Dahl F., Bruland A., Kaesling H., Michalakopoulos T., Cardu M., Hagan P., Aydin H., Ozarlan A. ISRM Suggested Method for Determining the Abrasivity of Rock by the CERCHAR Abrasivity Test // *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2014, vol. 47, pp. 261–266. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00603-013-0518-0>.
16. Mohammad-Taghi Hamzaban, Behnam Karami, Jamal Rostami. Effect of Pin Speed on Cerchar Abrasion Test Results // *Journal of Testing and Evaluation*. 2019, vol. 47, issue 1, pp. 121–139. DOI: <https://doi.org/10.1520/JTE20170406>.
17. Majeed Y., Abu Bakar M. Z. Effects of variation in the particle size of the rock abrasion powder and standard rotational speed on the NTNU/SINTEF abrasion value steel test // *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. 2019, vol. 78, pp. 1537–1554. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10064-017-1211-4>.
18. Qian Li, Junping Li, Longchen Duan, Songcheng Tan. Prediction of rock abrasivity and hardness from mineral composition // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2021, vol. 140, 104658. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2021.104658>.
19. Martin Feinendegen, Martin Ziegler. The significance of the LCPC test as a tool for the specification of homogeneous areas // *Geomechanics and Tunneling*. 2018, vol. 11, issue 2, pp. 94–184. DOI: <https://doi.org/10.1002/geot.201800004>.
20. Voznesensky A. S., Mazein S. V., Prishchepov V. V., Kutkin Ya. O. Abrasiveness Assessment of Geomaterials by Parameters of Acoustic Emission in Disintegration // *Journal of Mining Science*. 2024, vol. 60, issue 3, pp. 397–406. <https://doi.org/10.1134/S1062739124030050>. 

## REFERENCES

1. Zhang G., Konietzky H. Cerchar Abrasion Ratio (CAR) as a New Indicator for Assessing Rock Abrasivity, Rock–Stylus Interaction and Cutting Efficiency. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2020, vol. 53, pp. 3363–3371. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00603-020-02112-4>.
2. Mazein S. V., Voznesensky A. S., Prishchepov V. V. Methods of determining the abrasiveness of solid rock during mechanized excavation of long tunneling. *Geotechnics*. 2022, vol. 14, no. 3, pp. 44\_55. [In Russ]. DOI: <https://doi.org/10.25296/2221-5514-2022-14-3-44-54>.
3. Guangzhe Kurosch Thuro, Heinz Konietzky, Florian M. Menschik, Heiko Käsling, Michael Bayerl. In-situ investigation of drilling performance and bit wear on an electrical drill hammer. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2022, vol. 122, 104348. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tust.2021.104348>.
4. Abu Bakar M. Z., Majeed Y. Dependence of Drillability Parameters on Engineering Properties of Selected Rocks from Pakistan. *Journal of Mining Science*. 2024, vol. 60, pp. 87–101. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1062739124010101>.
5. Ghodrat Barzegari, Ali Uromeihy, Jian Zhao. Parametric study of soil abrasivity for predicting wear issue in TBM tunneling projects. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2015, vol. 48, pp. 43–57. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tust.2014.10.010>.
6. Jakobsen P. D., Bruland A., Dahl F. Review and assessment of the NTNU / SINTEF Soil Abrasion Test (SAT™) for determination of abrasiveness of soil and soft ground. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2013, vol. 37, pp. 107–114. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tust.2013.04.003>.

7. Hashemnejad A., Hassanpour J. Proposed soil classification based on the experiences of soft-ground tunneling in Iran. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. 2017, vol. 76, pp. 731–750. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10064-016-0868-4>.
8. Zhabin A. B., Polyakov A. V., Averin E. A. Of the need to introduce a state standard for determination of rock abrasiveness. *Ugol'*. 2018, no. 11, pp. 86–91. DOI: <http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2018-11-86-91>.
9. Mazein S. V. Optimisation of rotor equipment and periodicity of replacement of the cutting tool at shield drive of tunnel and other mine excavation. *Gornyi Zhurnal*. 2009, no. 10, pp. 84–86. [In Russ].
10. Masood Zahiri Galeshi, Kamran Goshtasbi, Jafar Khademi Hamidi, Kaveh Ahangari. Numerical Investigation of Effect of Rock Bolt Angle on Shear Behavior of Rock Bridges. *Journal of Mining and Environment*. 2020, vol. 11, no. 4, pp. 1095–1113. DOI: <https://doi.org/10.22044/jme.2020.9933.1922>.
11. Duan Wenjun, Zhang Mengqi, Gou Bin, Mo Jiliang, Zhou Zhongrong. Influence of Cross-Section Profile on Wear Behavior of TBM Cutters in Hard Rock Stratum. *Tribology*. 2023, vol. 43, no. 7, pp. 738–749. DOI: [10.16078/j.tribology.2022102](https://doi.org/10.16078/j.tribology.2022102).
12. Kojfman M. I. *Abrazivnye svoystva mineral'nyh chastic*, Moscow, tipografija im. K. Marksa, 1932, 64 p. [In Russ].
13. Baron L. I., Kuznecov A. V. *Abrazivnost' gornyh porod pri dobyvanii*, Moscow, Izdatel'stvo AN USSR, 1961, 167 p. [In Russ].
14. Käsling H., Thuro K. Determining rock abrasivity in the laboratory. *Rock Mechanics in Civil and Environmental Engineering – Proceedings of the European Rock Mechanics Symposium, EUROCK 2010*, 2010, pp. 425–428.
15. Alber M., Yarali O., Dahl F., Bruland A., Kaesling H., Michalakopoulos T., Cardu M., Hagan P., Aydin H., Ozarslan A. ISRM Suggested Method for Determining the Abrasivity of Rock by the CERCHAR Abrasivity Test. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2014, vol. 47, pp. 261–266. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00603-013-0518-0>.
16. Mohammad-Taghi Hamzaban, Behnam Karami, Jamal Rostami. Effect of Pin Speed on Cerchar Abrasion Test Results. *Journal of Testing and Evaluation*. 2019, vol. 47, issue 1, pp. 121–139. DOI: <https://doi.org/10.1520/JTE20170406>.
17. Majeed Y., Abu Bakar M. Z. Effects of variation in the particle size of the rock abrasion powder and standard rotational speed on the NTNU/SINTEF abrasion value steel test. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. 2019, vol. 78, pp. 1537–1554. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10064-017-1211-4>.
18. Qian Li, Junping Li, Longchen Duan, Songcheng Tan. Prediction of rock abrasivity and hardness from mineral composition. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2021, vol. 140, 104658. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2021.104658>.
19. Martin Feinendegen, Martin Ziegler. The significance of the LCPC test as a tool for the specification of homogeneous areas. *Geomechanics and Tunneling*. 2018, vol. 11, issue 2, pp. 94–184. DOI: <https://doi.org/10.1002/geot.201800004>.
20. Voznesensky A. S., Mazein S. V., Prishchepov V. V., Kutkin Ya. O. Abrasiveness Assessment of Geomaterials by Parameters of Acoustic Emission in Disintegration. *Journal of Mining Science*. 2024, vol. 60, issue 3, pp. 397–406. <https://doi.org/10.1134/S1062739124030050>.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Мазейн Сергей Валерьевич*<sup>1</sup> — докт. техн. наук, доцент, e-mail: maz-bubn@mail.ru, ORCID ID: 0009-0001-8557-8906;

*Прищепов Владимир Васильевич*<sup>1</sup> — аспирант, e-mail: wowpolo96@mail.ru, ORCID ID: 0009-0000-6458-3290;

*Вознесенский Александр Сергеевич*<sup>1</sup> — докт. техн. наук, профессор, e-mail: asvoznensenskii@misis.ru, ORCID ID: 0000-0003-0926-1808;

*Куткин Ярослав Олегович*<sup>1</sup> — канд. техн. наук, доцент, e-mail: kutkin.yo@misis.ru, ORCID ID: 0000-0003-2644-3371;

<sup>1</sup> Университет науки и технологий МИСИС, 119049, Москва, Ленинский пр-кт, д. 4, стр. 1, Россия.

**Для контактов:** *Вознесенский А. С.*, e-mail: asvoznensenskii@misis.ru.

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*Mazein S. V.*<sup>1</sup>, Dr. Sci. (Eng.), associate Professor, e-mail: maz-bubn@mail.ru, ORCID ID: 0009-0001-8557-8906;

*Prishchepov V. V.*<sup>1</sup>, PhD Student, e-mail: wowpolo96@mail.ru, ORCID ID: 0009-0000-6458-3290;

*Voznesenskii A. S.*<sup>1</sup>, Dr. Sci. (Eng.), Professor, e-mail: asvoznensenskii@misis.ru, ORCID ID: 0000-0003-0926-1808;

*Kutkin Ya. O.*<sup>1</sup>, Cand. Sci. (Eng.), associate Professor, e-mail: kutkin.yo@misis.ru, ORCID ID: 0000-0003-2644-3371;

<sup>1</sup> University of Science and Technology MISIS, 119049, Moscow, Leninskii Prospect, 4, b.1, Russia.

**Corresponding author:** *Voznesenskii A. S.*, e-mail: asvoznensenskii@misis.ru.

Получена редакцией 02.09.2024; получена после рецензии 09.10.2024; принята к печати 10.10.2024.

Received by the editors 02.09.2024; received after the review 09.10.2024; accepted for printing 10.10.2024.

