

УДК 620.171:620.179

**РАЗРАБОТКА ЭМПИРИЧЕСКИХ ЗАВИСИМОСТЕЙ
ОЦЕНКИ ПРЕДЕЛА ПРОЧНОСТИ ПОРОД НА ОДНООСНОЕ СЖАТИЕ
С ПОМОЩЬЮ НЕРАЗРУШАЮЩИХ МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ**

М. Б. Хаят^{1,2}, Д. Али¹, А. юр Рехман¹, А. Салим³, Н. Мустафа⁴

¹Миссурийский университет науки и технологий,

E-mail: mbhq57@mst.edu, 65401, г. Ролла, МО, США

²Университет инженерного дела и технологий, 54890, г. Лахор, Пакистан

³Главное горнорудное управление, 54000, г. Лахор, Пакистан

⁴Компания Dewan Cement Ltd, 74200, г. Карачи, Пакистан

Проведено определение предела прочности на одноосное сжатие с помощью молотка Шмидта и измерением скорости звука на образцах горной породы из известняковых пластов Сакесар и Намал. Для выявления возможных корреляций между результатами испытаний с разрушением и без разрушения применялся регрессионный анализ наименьших квадратов. Получены и проанализированы эмпирические зависимости для оценки предела прочности на одноосное сжатие по критерию Шмидта и скорости продольных и поперечных волн. Показано, что эмпирическая оценка предела прочности по критерию отскока молотка Шмидта более достоверна в большом диапазоне значений прочности для обоих пластов. Зависимости, в которых используются скорости продольных и поперечных волн, достоверны от малых до средних значений прочности.

Известняк, предел прочности на одноосное сжатие, корреляция, точечная нагрузка, молоток Шмидта, скорость продольных и поперечных волн

DOI: 10.15372/FTPRPI20190603

Обширная лабораторная база данных технологических и механических свойств горных пород является необходимой для характеристики любых строительных площадок или других горных, геологических и геотехнических инженерных сооружений. Предел прочности на одноосное сжатие — один из наиболее важных параметров, необходимый для горного инженера при проектировании [1, 2]. Прямые методы определения предела прочности дороги требуют много времени и не могут быть применимы в случае сильно выветрелой горной породы, так как имеются значительные сложности в получении необходимого числа образцов требуемого качества [2–4]. Косвенные методы определения стали популярными благодаря простой и быстрой технологии. Для косвенной оценки предела прочности на одноосное сжатие используется молоток Шмидта, индекс точечной нагрузки, предел прочности на удар и измерение скорости звука [5, 6].

Для определения механических и технологических свойств, таких как предел прочности на одноосное сжатие, модуль упругости, пористость, коэффициент загрязнения и т. д., используются методы разрушающего и неразрушающего контроля. В дальнейшем эти данные можно применять для расчета хрупкости породы [7]. Метод молотка Шмидта легок в осуществлении и не требует подготовки необходимых образцов. Измерение скорости звука — один из косвенных методов неразрушающего контроля для оценки предела прочности на одноосное сжатие горной породы, определения модуля упругости, предела прочности на растяжение, пористости, плотности и т. д. В табл. 1 представлены эмпирические зависимости для оценки предела прочности на одноосное сжатие по критерию отскока молотка Шмидта и по скорости продольной волны.

ТАБЛИЦА 1. Перечень эмпирических зависимостей для оценки предела прочности на одноосное сжатие

Корреляционная зависимость	R	Горная порода	Исследователи
$\sigma_c = 6.9 \cdot 10^{[0.16+0.0087(N\rho)]}$	—	Осадочная	Deere and Miller [8]
$\sigma_c = 0.477e^{[0.045(N)+\rho]}$	—		Kidybinski [9]
$\sigma_c = k\rho V_p^2 + A$	—		Inoue and Ohomi [10]
$\sigma_c = 2N$	0.520		Singh et al. [11]
$\sigma_c = 0.4N_{LM} - 0.36$	0.880		Shorey et al. [12]
$\sigma_c = 0.994N - 0.383$	0.490	Уголь	Haramay and De Marco [13]
$\sigma_c = 0.88N - 12.11$	0.760	Индийский уголь	Ghose and Chakrabarti [14]
$\sigma_c = 702N - 11040$	0.590	Осадочная	O'Rourke [15]
$N = 0.2329\sigma_c + 15.7244$	0.830	Мрамор, известняк, доломит	Sachpazis [16]
$\sigma_c = 4.3 \cdot 10^{-2}(N\rho_{dry}) + 1.2$	—	Песчаник Карбонатная	Cargill and Shakoор [2]
$\sigma_c = 1.8 \cdot 10^{-2}(N\rho_{dry}) + 2.9$	—		
$\sigma_c = 1.31N - 2.52$	0.302	Габбро, базальт	Aggistalis et al. [17]
$\sigma_c = 4.5 \cdot 10^{-4} N^{2.46}$	0.870	Осадочная	Kahraman et al. [18]
$\sigma_c = 35.5V_p - 55$	0.800	Магматическая	Tugrul and Zarif [19]
$\sigma_c = 0.792 + 0.067N \pm 0.231$	0.920	Случайная	Katz et al. [20]
$\sigma_c = 9.95V_p^{1.21}$	0.830	Осадочная	Kahraman [5]
$\sigma_c = 6.97e^{[0.014(N\rho)]}$	0.780		Kahraman [5]
$\sigma_c = 0.77V_p^{2.93}$	0.990		Horsrud [21]
$\sigma_c = 2.75N - 36.83$	0.910	Вулканическая	Dincer et al. [22]
$\sigma_c = 0.783e^{0.882V_p}$	0.530	Магматическая	Entwisle et al. [23]
$\sigma_c = 0.0292V_p^{4.79}$	0.530		
$V_p = 0.032\sigma_c + 2.02$	0.800	Осадочная	Yasar et al. [24]
$\sigma_c = 0.156V_p - 692.4$	0.800		Chary et al. [25]
$\sigma_c = 0.14V_p - 24.86$	0.510		
$\sigma_c = 0.064V_p - 118$	0.900		Sharma and Singh [26]
$\sigma_c = 0.041(V_p)_{dry} - 36.31$	0.720	Магматическая	Vasconcelos et al. [27]
$\sigma_c = 2.304V_p + 2.4315$	0.940	Осадочная	Kilic and Teymen [28]
$\sigma_c = 0.0137N^{2.2721}$	0.935		Kilic and Teymen [28]
$\sigma_c = 1.86e^{0.0004V_p}$ (верхний слой)	—		Осадочная
$\sigma_c = 0.95e^{0.0011V_p}$ (средний слой)			
$\sigma_c = 1.86e^{0.0013V_p}$ (нижний слой)			
$\sigma_c = 0.258V_p^{3.543}$	0.920	Осадочная	Yagiz [30]
$\sigma_c = 49.4V_p - 167$	0.890		

Примечание: σ_c — предел прочности на одноосное сжатие, МПа; ρ — плотность горной породы, г/см³; V_p — скорость продольной волны, км/с; N_{LM} — значение критерия отскока ниже среднего

Цель настоящей работы — определение предела прочности на сжатие известняка месторождений Намал и Сакесар различными разрушающими и неразрушающими методами, а также разработка и анализ эмпирических математических зависимостей для оценки предела прочности на одноосное сжатие.

Представленная база данных свойств горной породы будет полезна производителям цемента в будущей перспективе, так как включает сведения, необходимые для выбора подходящего бурового инструмента; эффективного проектирования взрывных работ; выбора подходящего метода экскавации и соответствующего оборудования; более точной характеристики участка. При стоимостной оценке и планировании новых рискованных решений она обладает более подробной информацией о сырьевом материале для цемента, который идет на экспорт в Индию, ОАЭ и т. д. Результаты могут быть важны для проектировщиков, составителей планов и подрядчиков, работающих в рассматриваемой области.

МЕСТОПОЛОЖЕНИЕ И ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА ОБЪЕКТА ИССЛЕДОВАНИЯ

Образцы собраны в известняковом карьере около деревни Хайпур вдоль дороги Каллар Кахар-Чоа в 12 км на юго-восток от Каллар Кахар, район Чаквал, Пенджаб, Пакистан. Координаты области: $32^{\circ} 43' 53''$ с.ш. $72^{\circ} 48' 46''$ в.д. (номер топографического листа в Пакистане 43 D/14).

Стратиграфическая последовательность пластов включает осадочные породы от нижнего пермского периода до четвертичного: глина, песчаник, алевроит (пласт Сардхай, ранний пермский период); известняк, глинистый сланец, известковая глина и песчаник (пласт Патала, поздний палеоценовый период); известняк, глинистый сланец и известковая глина (пласты Сакесар и Чоргали, эоценовый период); песчаник, известковая глина, глина и конгломерат (пласт Мурри, нижний миоценовый период); песчаник, известковая глина и конгломерат (пласт Камлиал, середина и конец миоценового периода). Эти литологические группы пород перекрыты слоем аллювия, в который входят глина, ил и гравий позднего четвертичного периода. Два основных несогласных залегания находятся между пластами Сардхай и Патала и пластами Чоргали и Мурри, что является признаками поднятия, эрозии и других тектонических процессов. Месторождение известняка, который применяется в производстве цемента, принадлежит пластам Наммал, Сакесар и Чордали раннего эоценового периода.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Большая часть образцов горной породы собрана из известнякового карьера. Размер блоков позволял получить несколько кернов породы из каждого блока. При осмотре блоки с видимыми дефектами и следами выветривания исключались. Подготовлено 25 наборов кернов. Основная часть образцов испытывалась молотком Шмидта, тогда как измерение предела прочности на одноосное сжатие и замеры скорости звука проводились с хорошо подготовленными кернами.

Молоток Шмидта представляет собой устройство, которое применяется для измерения твердости поверхности, сопротивления проникновению и/или прочности бетона или горной породы. Данный метод является косвенным и неразрушающим для определения прочности материала. Испытание молотком Шмидта проведено по стандарту ASTM C805 [31]. Собрано 25 показаний и в соответствии со стандартом отброшено 5 наименьших значений. Критерий отскока рассчитывался по среднему значению оставшихся показаний.

Керны изготавливались с помощью тонкостенного алмазного бура (рис. 1а). Размеры кернов NX (диаметр 54 мм, соотношение высоты к диаметру 2 : 3) рассчитаны по стандарту [32]. Для соответствия образцов стандартам ISRM применялся полировальный станок ELE UK (рис. 1б) [33]. Измерения скорости звука и предела прочности на одноосное сжатие проводились на одинаковых цилиндрических кернах по стандартам ASTM.

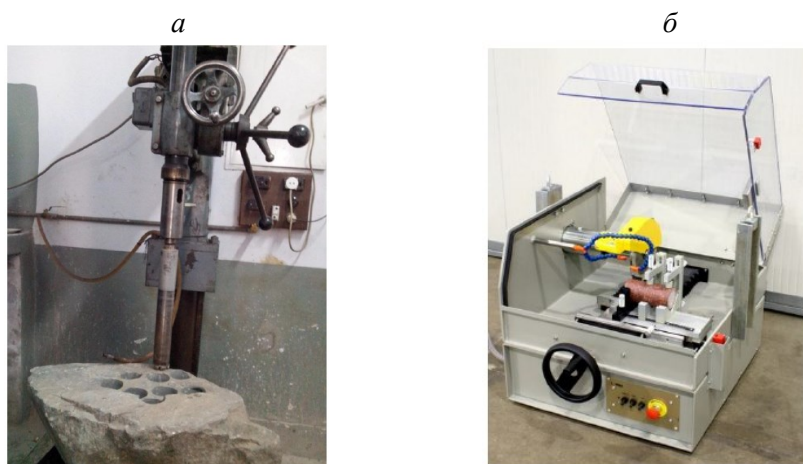


Рис. 1. Тонкостенный алмазный бур, применяемый для получения кернов горной породы размером NX; полировальный станок ELE UK (б)

Измерение скорости звука является косвенным неразрушающим методом определения предела прочности. *P*-волны (первичные волны) представляют собой волны сжатия, которые по своей природе являются продольными. Они могут распространяться в любом материале со скоростью, которая примерно в 2 раза больше скорости поперечных волн. Измерение скорости звука осуществлялось с помощью портативного ультразвукового неразрушающего цифрового индикаторного тестера PUNDIT, который соответствует стандартам ASTM (1995) [34]. Принцип работы данного устройства показан на рис. 2.

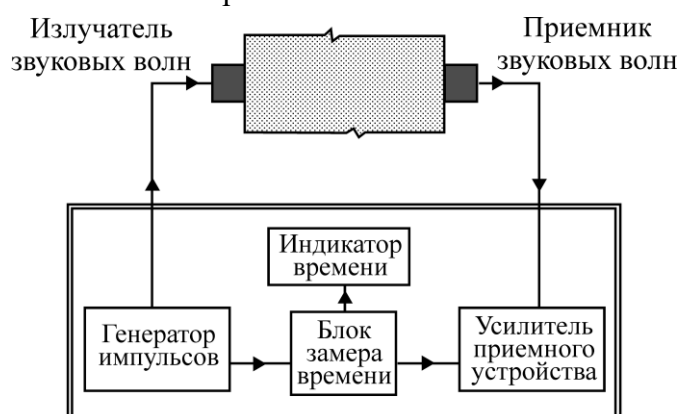


Рис. 2. Принцип работы тестера PUNDIT

Перед экспериментом устройство откалибровано с помощью специального стержня, который состоит из стандартного материала для калибровки. Датчик продольных и поперечных волн имеет резонансную частоту 1 МГц. Для определения скорости звука керны горной породы располагались между излучателем и приемником. Для более эффективного контакта образца с датчиками торцы покрыты тонким слоем пластичной смазки. В процессе эксперимента фиксировалось

время прохождения звуковой волны через образец. Скорости продольных и поперечных волн рассчитывались по формуле $V = S/t$, где S — расстояние прохождения звуковой волны (длина образца); t — время прохождения продольных и поперечных волн через образец.

Прочность на сжатие представляет собой способность материала или конструкции противостоять направленной по оси нагрузке до максимального предела. Измерение предела прочности на одноосное сжатие проведено в соответствии со стандартами ASTM (2010) [35]. Для определения предела прочности на одноосное сжатие образцов горной породы применялась универсальная испытательная машина Shimadzu с максимальной нагрузкой 200 т. Постоянная нагрузка прилагалась по оси к цилиндрическому образцу породы. Степень нагрузки регулировалась таким образом, чтобы разрушение образца происходило через 5–10 мин. На рис. 3 показано разрушение образца, когда в одном из испытаний нагрузка превысила допустимую прочность. Фиксировалась критическая нагрузка и площадь поперечного сечения образца. Расчет предела прочности выполнен по формуле $UCS = F/A$, где F — критическая нагрузка, Н; A — изначальная площадь поперечного сечения образца, м².



Рис. 3. Разрушение образца при измерении предела прочности на одноосное сжатие испытательной машиной Shimadzu

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Проведены измерения предела прочности на одноосное сжатие, отскока молотка Шмидта и скорости звука в образцах горной породы из пластов Сакесар и Намал. Для каждого испытания и для каждого пласта определен коэффициент вариации. Данный параметр выражается в процентах и определяется отношением среднеквадратичного отклонения к математическому ожиданию. При более высоком коэффициенте вариации результаты измерений имеют больший разброс. Для установления корреляции результатов измерения предела прочности на одноосное сжатие с результатами отскока молотка Шмидта и измерениями скорости звука с использованием метода наименьших квадратов выполнен регрессионный анализ полученных данных. Для каждого анализа регрессии определено уравнение идеальной прямой и коэффициент корреляции R . Таким образом получена эмпирическая зависимость, которая может применяться для оценки предела прочности на одноосное сжатие по результатам косвенных измерений. Формула расчета коэффициента корреляции Пирсона для каждой эмпирической модели имеет следующий вид:

$$R = \frac{n \sum xz - \sum x \sum z}{\sqrt{[n \sum x^2 - (\sum x)^2][n \sum z^2 - (\sum z)^2]}}$$

где n — общее количество данных; x, z — множество фактических и рассчитанных значений.

Для расчета предела прочности на одноосное сжатие образцы размером NX подверглись критической нагрузке, через которую можно выразить предел прочности. Предел прочности на сжатие колеблется от 100.37 до 170.77 МПа для известняка из пласта Сакесар и от 100.18 до 134.1 МПа для известняка из пласта Намал. Коэффициент вариации для пласта Сакесар составил 14.92 %, для пласта Намал — 9.30 %.

Испытание молотком Шмидта выполнено для получения критерия отскока от образцов породы. Среднее значение по 20 показаниям принято в качестве критерия отскока для каждого образца. Значения критерия отскока располагались в диапазоне от 19.2 до 29.8 для известняка из пласта Сакесар и от 18.8 до 26.4 для известняка из пласта Намал. Коэффициент вариации для известняка из пласта Сакесар составил 12.41 %, для известняка из пласта Намал — 9.82 %. На рис. 4 представлена корреляция между средними значениями критерия отскока и соответствующим пределом прочности на одноосное сжатие для пластов Сакесар и Намал.

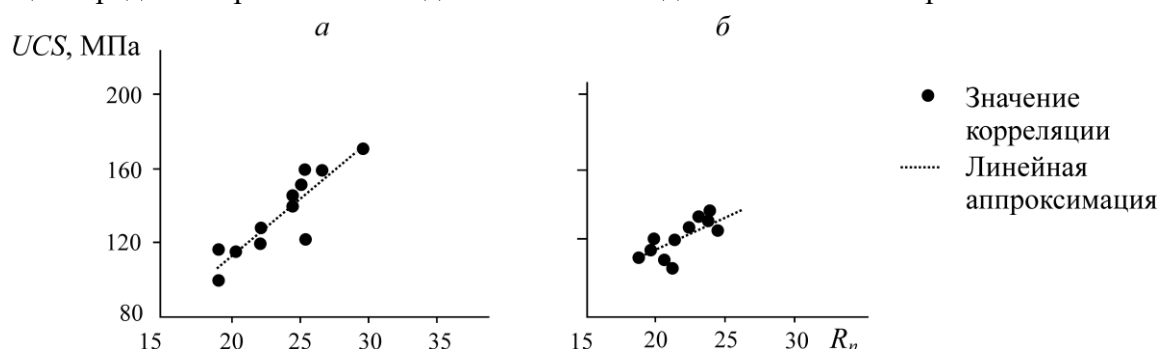


Рис. 4. Корреляция между пределом прочности на одноосное сжатие и критерием отскока молотка Шмидта R_n для пластов Сакесар (а) и Намал (б)

В ходе испытаний получены согласующиеся результаты для обоих пластов. Однако коэффициент корреляции R для известняка из пласта Сакесар выше по сравнению с таковым пласта Намал. Линия тренда известняка из пласта Сакесар немного круче, чем линия тренда известняка из пласта Намал, так как коэффициент вариации для известняка из пласта Сакесар выше. Формулы $UCS = 61.277R_n - 109.55$, $UCS = 38.079R_n + 341.76$, где R_n — критерий отскока молотка Шмидта, показывают эмпирические зависимости для оценки предела прочности на одноосное сжатие при помощи критерия отскока для пластов Сакесар и Намал соответственно.

ИЗМЕРЕНИЕ СКОРОСТИ ЗВУКА

Скорости продольных и поперечных волн измерены для каждого образца породы. Скорости продольных волн находятся в диапазоне от 0.520 до 0.673 км/с для известняка из пласта Сакесар и от 0.51 до 0.58 км/с для известняка из пласта Намал. Коэффициент их вариации составил 6.62 и 4.85 % для известняка пластов Сакесар и Намал соответственно. Значения скорости поперечных волн лежат в диапазоне 0.400–0.673 км/с для известняка из пласта Сакесар и 0.45–0.68 км/с для известняка из пласта Намал. Коэффициент их вариации составил 17.18 и 11.87 % для известняков из пласта Сакесар и Намал соответственно. На рис. 5а показана корреляция между значениями скорости продольных волн и соответствующим пределом прочности на одноосное сжатие для известняка пластов Сакесар и Намал. Линия тренда, характерная для известняка пласта Сакесар, круче, чем линия тренда для известняка пласта Намал, так как коэффициент вариации для известняка из пласта Сакесар выше.

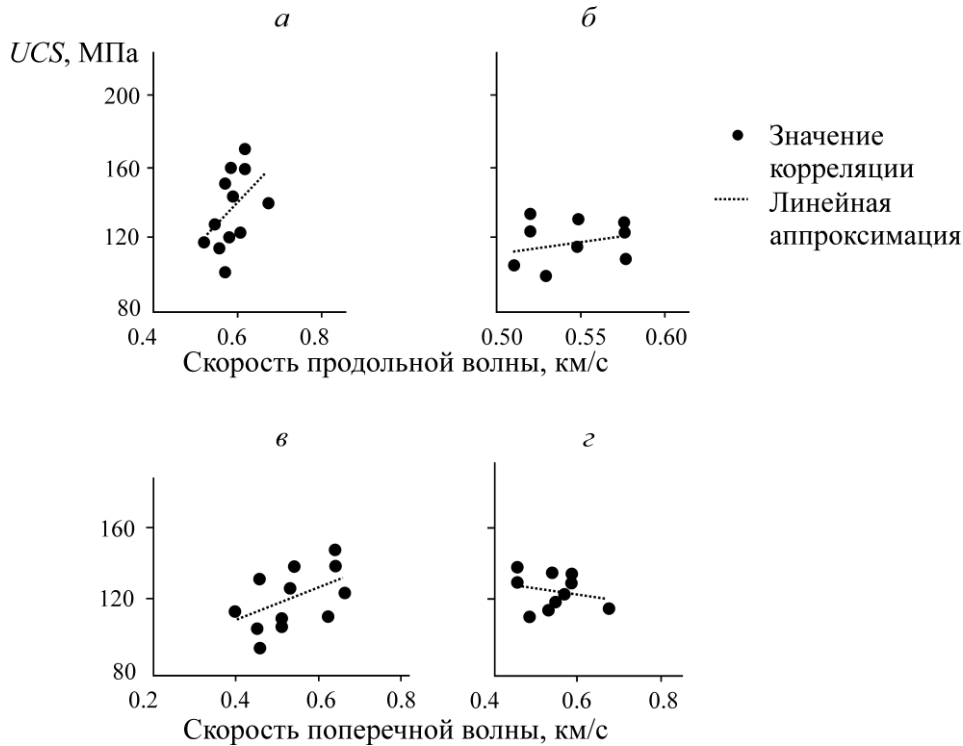


Рис. 5. Корреляция между пределом прочности на одноосное сжатие и скоростью продольной и поперечной волны для пластов Сакесар (а, в) и Намал (б, г)

На рис. 5б приведена корреляция между значениями скорости поперечных волн и пределом прочности на одноосное сжатие для пластов Сакесар и Намал. Коэффициент корреляции как продольных, так и поперечных волн выше для известняка пласта Сакесар по сравнению с пластом Намал. В ходе испытаний получены согласующиеся результаты для обоих пластов.

В табл. 2 сведены все эмпирические зависимости с соответствующими коэффициентами корреляции, рассчитанные путем анализа регрессии экспериментальных данных, для оценки предела прочности на одноосное сжатие известняка пластов Сакесар и Намал.

ТАБЛИЦА 2. Эмпирические зависимости и коэффициент корреляции

Пласт	Корреляционная зависимость	R
Сакесар	$UCS = 61.277R_n - 109.55$	0.899
	$UCS = 263.12V_p - 18.854$	0.532
	$UCS = 115.16V_s + 73.25$	0.524
Намал	$UCS = 38.079R_n + 341.76$	0.751
	$UCS = 122.89V_p + 50.865$	0.297
	$UCS = -40.224V_s + 139.61$	0.238

С помощью оценки коэффициентов вариации всех методов измерения делается вывод о том, что для обоих пластов результаты измерения скорости продольных волн являются наиболее согласованными. Несмотря на то, что результаты других методов не настолько согласованы, их вариация находится в допустимых для большинства инженерных задач пределах.

Для оценки предложенных эмпирических методов необходимо сравнить их результаты. Пределы прочности на одноосное сжатие рассчитаны на основе данных прямых испытаний и по соответствующей эмпирическим зависимостям. На рис. 6 представлено сравнение рассчитанного значения предела прочности на одноосное сжатие с измеренным для пластов Сакесар и Намал соответственно. Чем ближе точка значения к корреляционной линии, тем ближе оценочное значение предела прочности к фактическому



Рис. 6. Сравнение рассчитанного и измеренного предела прочности на одноосное сжатие для пластов Сакесар (а) и Намал (б)

Для известняка из пласта Сакесар при низких значениях предела прочности точки всех испытаний близки к линии корреляции. При повышении предела прочности точки начинают расходиться, особенно в случае скоростей продольных и поперечных волн. Эмпирические зависимости дают наиболее точную оценку предела прочности в пласте Сакесар при значениях прочности ниже среднего. Точки для скоростей продольных и поперечных волн пласта Намал имеют большее расхождение при средних значениях прочности. Эмпирические зависимости, в основе которых лежит испытание молотком Шмидта, являются наиболее точными во всех диапазонах значений предела прочности для обоих пластов. Результаты других двух зависимостей близки в достаточно широком диапазоне значений предела прочности.

ВЫВОДЫ

По стандартам ASTM выполнены испытания по определению предела прочности на одноосное сжатие образцов размера NX из известняковых пластов Сакесар и Намал с помощью молотка Шмидта, измерения скорости звука и прямого измерения. Полученные результаты обработаны статистически с помощью метода регрессионного анализа. Выявлены эмпирические зависимости результатов разрушающих и неразрушающих методов. Показано, что корреляционная зависимость, основанная на критерии отскока молотка Шмидта, наиболее точно определяет предел прочности на одноосное сжатие в широком диапазоне значений для обоих пластов.

Разработанные эмпирические корреляции являются эффективным инструментом оценки предела прочности для производителей цемента. Знание предела прочности поможет в дальнейшем при проектировании взрывных работ, выборе оборудования и в решении задач горного планирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Bieniawski Z. T.** Estimating the strength of rock materials, *J. S. Afr. Inst. Min. Metall.*, 1974, Vol. 74. — P. 312–320.
2. **Cargill J. and Shakoor A.** Evaluation of empirical methods for measuring the uniaxial compressive strength, *Int. J. Rock Mech. and Min. Sci.*, 1990, Vol. 27. — P. 495–503.

3. **Gokceoglu C. and Zorlu K.** A fuzzy model to predict the uniaxial compressive strength and modulus of elasticity of a problematic rock, *J. Eng. Appl. Artif. Intell.*, 2004, Vol. 71. — P. 61–72.
4. **Ceryan N., Okkan U., and Kesimal A.** Application of generalized regression neural networks in predicting the unconfined compressive strength of carbonate rocks, *J. Rock Mech. and Rock Eng.*, 2012, Vol. 45. — P. 1055–1072.
5. **Kahraman S.** Evaluation of simple methods for assessing the uniaxial compressive strength of rock, *Int. J. Rock Mech. and Min. Sci.*, 2001, Vol. 38. — P. 981–994.
6. **Chang C., Zoback M. D., and Khaksar A.** Empirical relations between rock strength and physical properties in sedimentary rocks, *J. Petroleum Sci. and Eng.*, 2006, Vol. 51. — P. 223–237.
7. **Hucka V. and Das B.** Brittleness determination of rocks by different methods, *Int. J. Rock Mech. and Min. Sci.*, 1974, Vol. 11. — P. 389–392.
8. **Deere D. U. and Miller R. P.** Engineering classification and index properties for intact rock, Air Force Weapons Laboratory, Kirtland Base, New Mexico, 1966.
9. **Kidybinski A.** Rebound number and the quality of mine roof strata, *Int. J. Rock Mech. and Min. Sci.*, 1968, Vol. 5. — P. 283–292.
10. **Inoue M. and Omi M.** Study on the strength of rocks by the Schmidt hammer test, *Rock Mechanics in Japan*, 1970, Vol. 1. — P. 177–179.
11. **Singh R. N., Hassani F. P., and Elkington P. S.** The application of strength and deformation index testing to the stability assessment of coal measures excavations, 24th US Symp. on Rock Mech., Texas A and M Univ. AEG, Balkema, Rotterdam, 1983.
12. **Shorey P. R., Barat D., Das M. N., Mukherjee K. P., and Singh B.** Schmidt hammer rebound data for estimation of large scale in-situ coal strength, *Tech. Note Int. J. Rock Mech. and Min. Sci. Geomech.*, Abstract, 1984, Vol. 21. — P. 39–42.
13. **Haramy K. Y. and DeMarco M. J.** Use of Schmidt hammer for rock and coal testing, 26th US Symp. Rock Mech., Rapid City, 1985.
14. **Ghose A. K. and Chakraborti S.** Empirical strength indices of Indian coals — an investigation, 27th US Symp. on Rock Mech., Balkema, Rotherdam, 1986.
15. **O'Rourke J. E.** Rock index properties for geoen지니어ing in underground development, *J. Min. Eng.*, 1989. — P. 106–110.
16. **Sachpazis C. I.** Correlating Schmidt hardness with compressive strength and Young's modulus of carbonate rocks, *Bul. Int. Association Eng. Geol.*, 1990, Vol. 42. — P. 75–83.
17. **Aggitalis G., Alivizatos G. S., Stamoulis D., and Stournaras G.** Correlating uniaxial compressive strength with Schmidt hardness, point load index, Young's Modulus, and mineralogy of gabbros and basalts (northern Greece), *Bul. Int Association Eng. Geol.*, 1996, Vol. 54. — P. 3–11.
18. **Kahraman S., Korkmazve S., and Akcay M.** The reliability of using Schmidt hammer and point load strength test in assessing uniaxial compressive strength, in K.T.U., Department of Geological Eng. 30th Year Symp. Book, Trabzon, 1996.
19. **Tugrul and Zarif I. H.** Correlation of mineralogical and textural characteristics with engineering properties of selected granitic rocks from Turkey, *J. Eng. Geol.*, 1999, Vol. 51. — P. 303–317.
20. **Katz O., Reches Z., and Roegiers J. C.** Evaluation of mechanical rock properties using a Schmidt Hammer, *Int. J. Rock Mech. and Min. Sci.*, 2000, Vol. 37. — P. 723–728.
21. **Horsrud P.** Estimating mechanical properties of shale from empirical correlations, *SPE Drill. Complet.*, 2001, Vol. 16. — P. 68–73.
22. **Dinçer I., Acar A., Cobangulu I., and Uras Y.** Correlation between Schmidt hardness, uniaxial compressive strength and Young's modulus for andesites, basalts and tuffs, *Bul. Eng. Geol. and Environment*, 2004, Vol. 63. — P. 141–148.

23. **Entwisle D. C., Hobbs P. N., Jones L. D., Gunn D., and Raines M. G.** The relationship between effective porosity, uniaxial compressive strength and sonic velocity of intact borrowdale volcanic groupe core samples from sallafield, J. Geotech. and Geol. Eng., 2010, Vol. 23. — P. 793–809.
24. **Yasar E. and Erdogan Y.** Correlating sound velocity with the density, compressive strength and young's modulus of carbonate rocks, Int. J. Rock Mech. and Min. Sci., 2004. — P. 871–875.
25. **Chary K. B., Sarma L. P., Prasanna Lakshmi K. J., Vijaya kumar N. A., Lakshmi V. N., and Rao M. M.** Evaluation of engineering properties of rock using ultrasonic pulse velocity and uniaxial compressive strength, in National Geophys. Res. I Proc. of National Seminar on Non-Destructive Evaluation, National Geophysical Research Institute, Hyderabad-500 007, 2006.
26. **Sharma P. K. and Singh T. N.** A correlation between P-wave velocity, impact index, slake durability and uniaxial compressive strength, Bul. of Eng. Geol. and Environment, 2007, Vol. 67. — P. 17–22.
27. **Vasconcelos G., Lourenco P. B., Alves C. A., and Pamplona J.** Prediction of the mechanical properties of granites by ultrasonic pulse velocity and Schmidt hammer hardness, in Tenth North American Masonry Conf., St. Louis, Missouri, USA, 2007.
28. **Kilic A. and Teymen A.** Determination of mechanical properties of rocks using simple methods, Bul. Eng. Geol. and Environment, 2008, Vol. 67. — P. 237–244.
29. **Wannakao L., Sriputorn S., and Trirat J.** Correlations between mechanical and ultrasonic wave properties of claystone from Mae Moh coal mine, Rock Mech., Fuenkajorn & Phien-wej (eds), 2009.
30. **Yagiz S.** P-wave velocity test for assessment of geotechnical properties of some rock materials, Indian Acad. Sci. and Bul. of Material Sci., 2011, Vol. 34, No. 4. — P. 947–953.
31. **A. C. 805-85.** Test for Rebound Number of Hardened Concrete, ASTM, USA, 1993.
32. **A. D-4543.** Standard practices for preparing rock core as cylindrical tests specimens and verifying conformance to dimensional and shape tolerances, Am. Soc. for Testing Materials, 2008.
33. **ISRM.** Rock characterization, testing and monitoring, ISRM Suggested Methods (ed. E.T. Brown), Pergamon, Oxford., 1981.
34. **A. D-2845.** Standard test method for laboratory determination of pulse velocities and ultrasonic elastic constants of rock, Am. Soc. for Testing Materials, 1995.
35. **A. D-7012.** Standard test method for compressive strength and elastic moduli of intact rock core specimens under varying states of stress and temperatures, Am. Soc. for Testing Materials, 2010.

Поступила в редакцию 05/III 2019

После доработки 21/XI 2019

Принята к публикации 27/XI 2019