

УДК 620.171:620.179

**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ОСНОВНЫХ МЕХАНИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ТУФОВ  
ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИСПЫТАНИЙ**

**А. Теймен**

*Университет Нигде, Факультет горного дела,  
E-mail: ateymen@ohu.edu.tr, 51240, г. Нигде, Турция*

Определены физико-механические свойства туфов, используемых в качестве строительного камня. Исследована взаимосвязь между механическими свойствами (прочность на сжатие, прочность на изгиб, абразивный износ и ударная вязкость) и физическими свойствами (открытая пористость, плотность сухого грунта, водопоглощение, скорость распространения продольных волн, твердость по Бринеллю и индекс прочности при приложении точечной нагрузки) туфов. Проведен статистический анализ для корреляции различных параметров.

*Твердость по Бринеллю, туф, физические свойства, отличительные свойства, ударопрочность, величина абразивного износа*

DOI: 10.15372/FTPRPI20180503

Механические и физические свойства горных пород имеют большое значение для инженерной деятельности, связанной с разработкой горных пород (архитектура, горное дело, гражданское строительство). Эксплуатационные качества пород под действием нагрузки зависят от механических и физических свойств этих материалов. Механические свойства материала определяют его реакцию на воздействие окружающего силового поля. Такие свойства горных пород, как объемная масса скелета грунта, пористость, статическая и динамическая прочность, угол внутреннего трения, модуль упругости, плотность, ударная вязкость, стойкость на абразивный износ и т. д., важны для безопасного и экономичного проектирования инженерных сооружений [1], а также при определении того, подходит ли порода для использования в строительстве.

Способность пород выдерживать внешние нагрузки можно охарактеризовать как прочность горных пород. Вид воздействия внешней силы зависит от типа потенциального использования горных пород. Это может быть сила сжатия, растягивающее усилие, абразивный износ, ударная нагрузка или их комбинация. Термин “строительный камень” используется для обозначения естественных горных пород, свойства которых соответствуют качественным требованиям. Все породы, которые могут быть добыты в форме больших блоков и обработаны в заданных формах и размерах, можно назвать строительными камнями. Под это определение подходят многие породы различного происхождения.

В последние годы использование туфов в качестве строительного и блочного камня значительно возросло. Их можно легко распиливать и придавать им нужный размер с помощью простых инструментов, однако их невозможно шлифовать, поэтому они применяются в качестве несущих, покрывающих и тротуарных элементов. Для этих целей применяются туфы различ-

ных цветов, добытые на горе Эрджияс (Турция). Туфы из Кайсери и Невшехира используются в качестве строительного и блочного камня на протяжении более 1000 лет, а некоторые здания, построенные из туфов, функционируют более 700 лет. Для отнесения скального образования к категории естественных пород, ему необходимо обладать определенными характеристиками. Технические и эстетические параметры — фундаментальные детерминанты промышленной ценности камня. Важно оценить, как долго поверхность строительного камня может сохранять оригинальные размеры и отличительные свойства. Основными параметрами при оценке строительного камня являются прочность на сжатие при воздействии осевых сил, прочность на изгиб, ударная вязкость при воздействии ударных усилий и стойкость на абразивный износ при использовании для облицовки и напольных покрытий.

Конструкционные свойства горных пород изучены большим количеством исследователей. Для определения механических свойств горных пород используются различные методы, однако многие из них разрушающие, дорогостоящие и трудоемкие. Для косвенной оценки основных конструкционных свойств туфов проведены лабораторные исследования с использованием практических методов, которые включают: твердость по Шмидту [2–10], твердость по склероскопу Шора [5, 11–13], индекс точечной нагрузки [13–22], скорость распространения ультразвуковых волн [3, 4, 17, 21–30], твердость по Бринеллю [31, 32], плотность и пористость [20, 33–36] и сопротивление истиранию [37, 38].

Для исследования корреляции между скоростями продольной волны, индексом эрозиоустойчивости, ударной прочностью и прочностью на сжатие использовались 11 различных типов пород, пять из которых — осадочные, одна — изверженная и три — метаморфические [26]. В [37] на 11 различных типах карбонатных пород определена связь между стойкостью на абразивный износ и свойствами горных пород. Большинство исследователей изучали корреляцию между физическими и механическими параметрами, некоторые классифицировали породы по происхождению. Как правило, существует взаимосвязь между пористостью неповрежденных пород, их прочностью на сжатие и модулем упругости, однако эти зависимости показывают большой разброс [39]. Для уточнения взаимосвязей различных характеристик, породы можно разделить на группы по происхождению, текстуре и минералогии. Хотя вулканическим породам свойственно единство происхождения, они характеризуются разными механическими и физическими свойствами. Большинство пород являются гомогенными и изотропными, а также содержат ксено- и гипокристаллы.

Цель настоящей работы — определение механических свойств отобранных вулканических пород, используемых в строительстве, а также исследование взаимосвязи между физическими и механическими свойствами вулканических пород посредством регрессионного анализа.

## **МАТЕРИАЛЫ И ХОД ИСПЫТАНИЙ**

Туфы для исследования получены из каменных карьеров, выходов пласта и перерабатывающих заводов в Кайсери и соседних городах Турции. Большинство этих туфов добывается и продается в качестве строительных материалов. В лабораторных испытаниях использовались части 27 разных туфов, имеющих широкий спектр физических и механических свойств. Туф — общее название консолидированного материала вулканического пепла. Каждый образец туфа исследовался в макроскопическом масштабе для удаления трещиноватых, фрагментированных или измененных зон. Собранным туфам придали требуемые размеры с помощью машин для резки и бурильных машин для колонкового бурения (рис. 1). Тип, местоположение, наименование и структурные особенности туфов представлены в табл. 1.



Рис. 1. Карьер строительного камня (а) и образцы туфа (б)

ТАБЛИЦА 1. Наименование, тип, структура и местоположение туфов

Код	Тип	Структура	Местоположение	Наименование и цвет
T-1	Дацитовый	Стекловатый	Кайсери/Томарза	Томарза, серый
T-2	Андезитовый	Лапилли	Кайсери/Басакпинар	Басакпинар, черный
T-3	Дацитовый	Стекловатый	Кайсери/Курукопру	Курукопру, серый
T-4	Риолитовый	Стекловатый	Кайсери/Курукопру	Курукопру, лиловый
T-5	Риолитовый	Литоидный	Кайсери/Курукопру	Курукопру, коричневый
T-6	Дацитовый	Лапилли	Кайсери/Басакпинар	Басакпинар, коричневый
T-7	Базальтовый	Лапилли	Кайсери/Меликгази	Гези, мореный
T-8	Риолитовый	Литоидный	Кайсери/Меликгази	Гези, коричневый
T-9	Дацитовый	Стекловатый	Кайсери/Меликгази	Гези, серый
T-10	Риолитовый	Стекловатый	Кайсери/Басакпинар	Басакпинар, желтый
T-11	Дацитовый	Лапилли	Кайсери/Эркилет	Эркилет, фиолетовый
T-12	Дацитовый	Стекловатый	Кайсери/Гези	Камбер, серый
T-13	Дацитовый	Стекловатый	Кайсери/Кочанис	Кочанис, желтый
T-14	Дацитовый	Литоидный	Кайсери/Басакпинар	Басакпинар, розовый
T-15	Игнимбритовый	Литоидный	Кайсери/Томарза	Томарза, черный
T-16	Риолитовый	Стекловатый	Кайсери/Томарза	Томарза, желтый
T-17	Андезитовый	Литоидный	Кайсери	Черный
T-18	Дацитовый	Литоидный	Кайсери	Фиолетовый
T-19	Игнимбритовый	Стекловатый	Невшехир/Гереме	Красный
T-20	Риолитовый	Стекловатый	Невшехир	Невшехир, серый
T-21	Риолитовый	Литоидный	Невшехир/Ургюп	Серый
T-22	Игнимбритовый	Стекловатый	Невшехир/Кавак	Розовый
T-23	Игнимбритовый	Стекловатый	Невшехир/Кавак	Кремевый
T-24	Риолитовый	Литоидный	Кайсери	Красный
T-25	Риолитовый	Стекловатый	Невшехир	Серый
T-26	Дацитовый	Лапилли	Кайсери	Коричневый
T-27	Дацитовый	Литоидный	Кайсери	Темно-коричневый

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Плотность сухого (скелета) грунта  $U_w$ , водопоглощение  $W$  и открытая (кажущаяся) пористость  $P_a$  определялись с использованием кубических образцов  $71 \times 71 \times 71$  мм по предлагаемым методикам в [40, 41]. Для расчета плотности сухого (скелета) туфа массу высушенного

образца делили на его объем. Для расчета значения водопоглощения (по массе) разницу между массой насыщенного образца и его сухой массой делили на массу сухого образца. Открытая (кажущаяся) пористость  $P_a$  (отношение объема пор к объему образца) рассчитывалась как разница веса насыщенного и сухого образца, деленная на плотность воды и объем образца. Вычисленные физические и механические свойства туфов приведены в табл. 2.

ТАБЛИЦА 2. Результаты испытания туфов (средние значения и стандартное отклонение)

Код	$U_{cs}$	$F_{ts}$	$D_n$	$B_{sa}$	НВ	$I_s$	$V_p$	$U_w$	$P_a$	$W$
	МПа			см <sup>3</sup> /50см <sup>2</sup>	кг/мм <sup>2</sup>	МПа	км/с	г/см <sup>3</sup>	%	
T-1	69.2±3.9	6.24±0.7	17.0±1.5	27.2±1.6	49.2±3.4	4.69±0.4	2.94±0.1	1.97±0.0	14.5±0.2	7.4±0.0
T-2	59.9±1.2	5.50±0.2	11.8±1.3	28.3±1.1	32.1±1.6	3.60±0.2	2.75±0.2	2.02±0.0	13.9±0.5	6.9±0.2
T-3	54.7±3.0	5.37±0.6	12.0±1.7	34.5±3.1	39.2±3.5	2.97±0.3	2.55±0.1	1.96±0.0	16.7±0.4	8.5±0.3
T-4	61.5±7.4	6.35±0.4	14.4±1.3	29.8±2.4	30.7±1.8	3.74±0.5	2.71±0.0	1.89±0.1	18.7±0.6	9.9±0.2
T-5	55.9±4.9	5.16±0.7	11.8±1.4	30.4±1.5	42.1±4.6	3.34±0.4	2.84±0.4	1.91±0.0	17.9±0.2	9.4±0.1
T-6	43.9±1.2	5.00±0.3	10.3±0.8	41.2±3.7	27.8±2.8	2.86±0.5	2.71±0.3	1.89±0.1	19.8±1.2	10.5±1.0
T-7	40.4±3.8	4.12±0.4	10.6±0.8	43.9±4.4	25.4±2.0	3.02±0.3	2.81±0.1	1.87±0.0	18.7±1.0	10.4±0.6
T-8	39.8±2.8	5.41±0.6	10.3±0.9	52.9±3.8	23.8±1.2	3.25±0.2	2.84±0.3	1.93±0.0	18.5±0.4	9.6±0.1
T-9	32.8±0.5	3.88±0.3	8.2±0.8	58.5±3.5	10.9±0.4	1.90±0.1	1.92±0.0	1.74±0.0	20.7±2.3	11.9±1.6
T-10	31.9±2.6	4.58±0.3	8.9±0.6	54.1±4.3	19.6±1.8	2.29±0.2	2.23±0.0	1.77±0.0	22.4±1.4	12.7±0.8
T-11	26.4±4.8	4.32±0.4	9.4±2.1	41.1±3.7	17.9±2.0	2.45±0.4	2.04±0.2	1.87±0.0	23.5±0.9	12.9±0.4
T-12	26.9±1.0	4.20±0.3	6.6±1.7	52.3±5.2	7.5±0.6	1.97±0.5	2.03±0.0	1.55±0.0	29.5±0.6	18.8±0.3
T-13	26.1±0.7	4.82±0.2	5.9±1.1	57.3±2.9	12.1±0.7	2.55±0.4	2.21±0.2	1.58±0.0	25.8±1.5	16.3±1.1
T-14	20.9±1.1	3.29±0.3	7.4±1.2	56.7±6.2	8.1±1.0	2.11±0.4	2.32±0.1	1.60±0.0	29.2±0.1	18.2±0.1
T-15	16.8±1.1	3.62±0.4	5.9±0.5	86.4±5.2	11.5±0.6	2.17±0.3	2.22±0.3	1.47±0.0	33.2±0.2	23.0±0.5
T-16	7.8±0.5	1.23±0.2	2.0±0.2	122.2±8.6	3.7±0.1	1.32±0.2	1.30±0.2	1.36±0.1	34.4±0.4	25.4±0.4
T-17	15.1±1.0	3.32±0.5	5.9±0.9	94.2±4.7	12.6±1.0	2.14±0.4	2.15±0.2	1.44±0.0	33.4±0.9	24.7±0.7
T-18	25.5±1.7	4.56±0.4	8.8±0.8	56.0±5.0	15.8±1.1	2.42±0.5	2.29±0.2	1.88±0.0	26.7±0.3	12.8±0.1
T-19	6.6±0.9	1.37±0.1	2.0±0.3	139.1±14	1.9±0.2	1.51±0.3	1.36±0.3	1.34±0.0	37.5±0.2	27.9±0.7
T-20	25.1±2.0	4.12±0.3	5.9±0.6	67.0±5.4	7.5±0.4	2.29±0.1	2.53±0.4	1.70±0.1	21.5±0.4	12.6±0.5
T-21	35.7±2.5	4.72±0.4	8.9±1.1	68.3±2.7	16.7±1.0	2.86±0.3	2.85±0.3	1.77±0.0	18.2±0.0	10.3±0.3
T-22	6.7±0.8	1.55±0.2	2.0±0.1	130.0±7.8	2.2±0.2	1.65±0.4	1.25±0.3	1.52±0.1	31.6±0.5	20.8±0.2
T-23	14.6±1.4	2.22±0.1	2.7±0.2	113.1±6.8	2.7±0.2	1.86±0.3	1.85±0.2	1.50±0.0	30.3±0.8	19.5±0.4
T-24	30.3±2.8	3.87±0.2	8.2±0.7	58.6±4.1	22.1±2.2	1.76±0.1	2.28±0.1	1.83±0.0	25.8±0.4	14.2±0.5
T-25	19.4±2.4	3.15±0.1	3.5±0.4	70.2±6.3	6.4±0.6	1.43±0.1	1.55±0.1	1.57±0.0	28.1±0.7	18.0±1.2
T-26	28.8±3.8	4.45±0.4	7.8±0.7	63.7±3.8	15.6±0.6	1.90±0.2	2.78±0.1	1.61±0.0	26.9±1.3	16.6±1.6
T-27	34.2±2.3	4.55±0.3	8.2±0.8	65.6±4.6	12.0±0.8	2.29±0.1	2.23±0.2	1.89±0.0	18.2±0.6	9.7±0.8

Одним из неразрушающих экспериментов, используемых для определения механических свойств горных пород, является измерение скорости распространения продольной  $P$ -волны  $V_p$ . Для испытаний взяты образцы цилиндрической формы диаметром 54 мм и длиной 100 мм, торцы которых параллельные, поверхность полированная. Для обеспечения полного контакта

между образцом и датчиками (приемником и передатчиком) применялся гель. Регистрировалось время пробега продольной  $P$ -волны в микросекундах. Скорость  $V_p$  рассчитывалась путем деления длины образца на время прохождения  $P$ -волны. Этот эксперимент повторяли 3 раза для каждого образца горной породы, среднее значение приведено в табл. 2.

Испытание на прочность при приложении точечной (сосредоточенной) нагрузки  $I_s$  считается косвенной мерой определения прочности горной породы. Оборудование для приложения точечной нагрузки широко используется на практике, так как для испытаний не требуется специальный образец, что позволяет реализовать его в полевом исполнении. Более предпочтительным для определения индекса точечной нагрузки  $I_s$  является “диаметральный” метод [41]. Для этого метода подготовлен цилиндрический образец с отношением длины образца к диаметру (54 мм) от 1.0 до 1.4. Для каждого типа горных пород испытаны от 7 до 10 образцов туфа, и средние значения индекса точечной нагрузки, полученные в результате этого теста, приведены в табл. 2.

Испытания на одноосное сжатие  $U_{cs}$  проводились на цилиндрических образцах диаметром 54 и 100 мм. На торцах образцов выполнялось условие параллельности, торцы были отшлифованы. Для определения предела прочности на неограниченное сжатие использовался пресс ELE-3000 кН. Скорость нагружения была постоянной до разрушения и составляла 1.0–1.2 МПа/с. Средние значения пределов прочности при сжатии вычислялись по данным семи испытаний, они показаны в табл. 2.

Прочность при испытании на изгиб  $F_{ts}$  определялась как максимальное напряжение, возникающее в образце материала при его разрушении при определенных условиях изгиба [1]. Сущность метода заключается в изгибе образца постоянного прямоугольного сечения, свободно лежащего на двух опорах, с постоянной скоростью нагружения до момента разрушения образца. Призматический образец нагружался сосредоточенной нагрузкой  $P$  в ее средней точке (трехточечный метод) или в двух разных точках (четырёхточечный метод) до разрушения [42]. Испытание образцов для определения  $F_{ts}$  проводилось с помощью метода четырёхточечного изгиба. Максимальное растягивающее напряжение на крайней точке нижней стороны образца считалось  $F_{ts}$  туфа. Если три расстояния между четырьмя точками равны (точки опоры и точки приложения нагрузок), то  $F_{ts}$  рассчитывается по уравнению  $F_{ts} = PL / bh^2$  ( $F_{ts}$  — прочность на изгиб породы, МПа;  $P$  — максимальная нагрузка, Н;  $L$  — длина пролета между опорами, мм;  $b$  — средняя ширина образца, мм;  $h$  — средняя толщина, мм). Призматические образцы, используемые в этом исследовании, имели размеры  $180 \times 60 \times 30$  мм (длина, средняя ширина и толщина соответственно). Для определения  $F_{ts}$  туфов использовалось не менее пяти образцов, средние значения приведены в табл. 2.

Ударной вязкостью  $D_n$  называется способность горной породы сопротивляться осевой ударной нагрузке [43]. Измерение  $D_n$  образцов горных пород проводилось на устройстве для испытаний ударной вязкости, описанном в [40]. Для испытания подготовили кубические образцы, имеющие размер ребра  $40 \pm 1$  мм, вычислили объем образцов. Согласно тестовой процедуре, первую высоту падения молотка определяли как ударную работу  $2 \text{ кг/см}^2$ . Для первого удара высота падения молотка (50 кг) для образца, имеющего объем  $V$  ( $\text{см}^3$ ), рассчитывалась по формуле  $H = kV$  ( $h$  — высота падения молотка, см;  $k = 2 \text{ кг} / 50 \text{ кг} = 0.04$  — коэффициент).

Образец помещали в центр наковальни испытательного аппарата. Стальную пластину устанавливали в центре исследуемого образца. Молоток поднимали на высоту  $H$ , открывали защелку и молот падал на образец. После первого удара высота падения каждого последующего удара пересчитывалась путем добавления первого рассчитанного значения  $H$  к предыдущей высоте падения. Испытания повторяли до тех пор, пока тестовый образец не разрушался. Ударную вязкость туфа вычисляли по формуле  $D_n = n(n+1)$  ( $n$  — число ударов, приводящих к разрушению породы). В испытаниях на ударную вязкость участвовали как минимум пять образцов. Полученные средние значения  $D_n$  представлены в табл. 2.

Разрушение частиц на поверхности строительного камня в результате механического воздействия, такого как трение и удар, может быть определено как абразивный износ  $B_{sa}$ . Проблема износа пород возникает из-за приложенной нагрузки и движения между поверхностями. Величина  $B_{sa}$  — характеристика, широко используемая в инженерных проектах. Величина абразивного износа — важный показатель пригодности камня в зонах повышенного движения [44]. Исследования абразивности туфов проводились на кубических образцах со сторонами 71 мм (площадь поверхности 50 см<sup>2</sup>). Для этой цели использовалось устройство Bohme [40, 44, 45].

В соответствии со стандартами, абразивная система включает стальной диск диаметром 750 мм и скоростью вращения  $30 \pm 1$  цикл/мин, счетчик и рычаг, с помощью которых нагрузка прикладывается на образец. Образцы, помещенные на диск, подвергались воздействию 440 циклов при нагрузке 300 Н при использовании 20 г абразивной пыли (кристаллический  $Al_2O_3$ ) в каждом цикле. Абразивный износ  $B_{sa}$  рассчитывали по разности размеров до и после испытания образца (табл. 2).

Твердость по Бринеллю (НВ) — широко используемый метод испытаний металлов, но не совсем подходящий для горной породы из-за ее хрупкой природы. Это показатель сопротивления горных пород сдавливанию, который напрямую связан с прочностью горных пород. Испытания проводились на дисках кернов диаметром 42 мм, толщиной 30 мм с параллельными торцами. Использовался сферический стальной шарик диаметром 10 мм, который контактировал с образцом горной породы. Нагрузки от 50 до 3000 кг прикладывали к поверхности породы в течение 30 с. Фиксировали нагрузку и измеряли диаметр области вдавливания. Значение твердости НВ (среднее для трех тестов) определялось как отношение приложенной нагрузки к площади поверхности вдавливания (табл. 2).

### ПРОГНОЗИРОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ

Результаты экспериментов для 27 типов горных пород (туфов) приведены в табл. 2. Видно, что плотность сухих горных пород  $U_w$  варьирует от 1.34 до 2.02 г/см<sup>3</sup>, открытая пористость  $P_a$  — 14.2–37.5 %, водопоглощение  $W$  — 7.0–27.9 %, скорость продольных волн  $V_p$  — 1.25–2.85 км/с, индекс точечной нагрузки  $I_s$  — 1.30–4.69 МПа, прочность на сжатие  $U_{cs}$  — 6.6–69.2 МПа. Согласно классификации Дира и Миллера [46], основанной на прочности на сжатие горных пород, 5 из них умеренно сильные ( $110 \geq U_{cs} \geq 55$  МПа), 9 — слабые ( $55.0 \geq U_{cs} \geq 27.5$  МПа), 13 — очень слабые ( $27.5 \text{ МПа} \geq U_{cs}$ ). Прочность на изгиб породы  $F_{ts}$  изменяется от 1.23 до 6.35 МПа, ударная вязкость тестируемых туфов  $D_n$  — 2–17 МПа, стойкость на абразивный износ  $B_{sa}$  — 28.3–139.1 см<sup>3</sup>/50 см<sup>2</sup> и твердость НВ — 1.9–49.2 кг/мм<sup>2</sup>.

Рассматривались корреляционные связи механических характеристик с тремя физическими характеристиками и индексом точечной нагрузки (индексной). Строились связи между каждой физической, индексной переменной и механической характеристикой. Значения прочности на сжатие, прочности на изгиб, ударной вязкости и стойкости на абразивный износ сопоставлялись со значениями водопоглощения, плотности сухого грунта, открытой пористости, скорости продольных волн, твердости по Бринеллю и индексом точечной нагрузки. Метод наименьшей квадратичной регрессии использовался для анализа механических параметров, связанных с физическими и индексными свойствами туфов. Для каждой регрессии определены оптимальное линейное уравнение и коэффициент корреляции  $R^2$ . Значения коэффициента  $R^2$  ниже 0.75 не считались значимыми. Такие значения  $R^2$  приняты для того, чтобы приблизительно оценить механические свойства, используемые в уравнениях.

*Прогнозирование прочности на сжатие  $U_{cs}$ .* Вследствие простоты испытаний породы, индекс точечной нагрузки  $I_s$  определен на образцах in situ. Связь между прочностью на сжатие  $U_{cs}$  и  $I_s$  показана на рис. 2а, из которого видно, что прочность на сжатие пород растет линейно с увеличением  $I_s$ . Эти результаты, полученные на примере вулканических пород, приводят к следующему уравнению ( $R^2 = 82$ ):

$$U_{cs} = 19.5I_s - 16.2.$$

Значения пористости важны для изучения физико-механических свойств горных пород. Пористость туфов  $P_a$  является результатом образования и изменения температуры или результатом неполного спекания и разделения газов. При охлаждении лавы в магматических породах появляются мелкие кристаллы, газы быстро выделяются и образуются пористые породы. Присутствие пор в породах влияет на ее свойства. Связь между открытой пористостью и прочностью на сжатие тестируемых туфов приведена на рис. 2б.

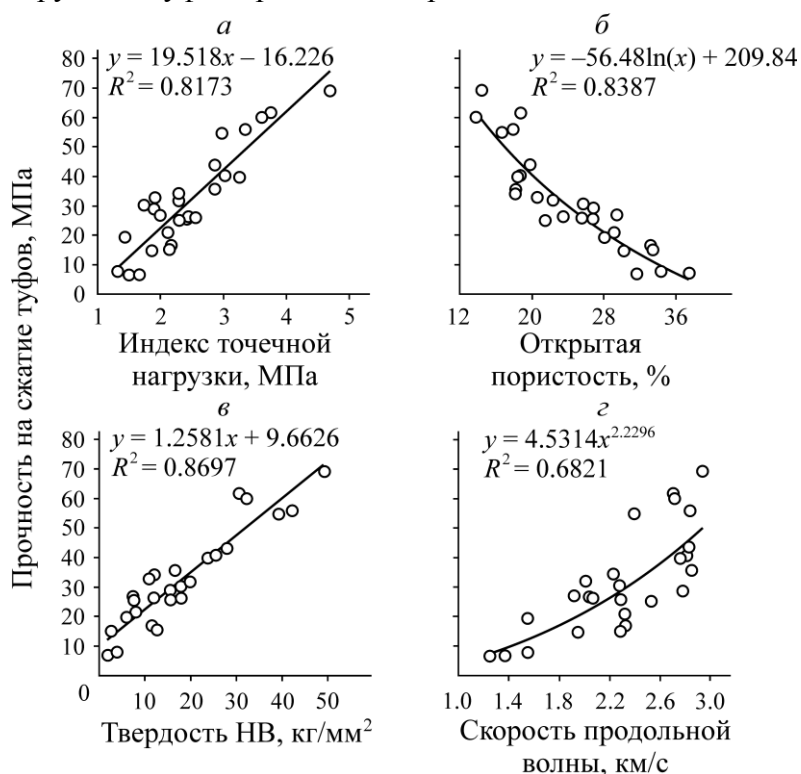


Рис. 2. Зависимость между физическими свойствами и прочностью на сжатие

Из рис. 2б видно, что существует обратная логарифмическая связь между прочностью на сжатие и открытой пористостью, т. е. прочность на сжатие туфов увеличивается с уменьшением открытой пористости. Высокопористые туфы показывают меньшие значения прочности на сжатие, чем низкопористые или плотные туфы. Чем больше степень пористости породы, тем меньше ее прочность на сжатие. Следующее уравнение представляет собой логарифмическую зависимость с наилучшим соответствием данных ( $R^2 = 84$ ):

$$U_{cs} = -56.5 \ln P_a + 210.$$

График прочности на сжатие как функции твердости по Бринеллю тестируемых туфов показан на рис. 2в, из которого следует, что прочность на сжатие линейно связана с твердостью по Бринеллю и увеличивается с увеличением твердости туфов. Наиболее значительная корреляция между этими параметрами представлена линейной кривой ( $R^2 = 87$ ):

$$U_{cs} = 1.26 \text{HB} + 9.7.$$

На рис. 2г приведена зависимость между скоростью продольной волны и прочностью на сжатие туфов. Существует слабая экспоненциальная зависимость между скоростью продольной волны и прочностью на сжатие. Согласно [37], на скорость продольной волны влияют минеральный состав, плотность и пористость горных пород. Значения прочности на сжатие породы возрастают с увеличением скорости продольной волны. Низкое значение скорости продольной волны является признаком низкой прочности горных пород. Связь между этими двумя свойствами горных пород представлена выражением ( $R^2 = 68$ ):

$$U_{cs} = 4.53 V_p^{2.23}.$$

*Прогнозирование прочности на изгиб  $F_{ts}$  породы.* Определение  $F_{ts}$  важно при анализе прочности и устойчивости кровли строительных отверстий в изгибной зоне камня. Из табл. 2 и рис. 3 следует, что существует хорошая корреляция между измеренными прочностью на изгиб  $F_{ts}$  и водопоглощением  $W$ , твердостью HB и индексом точечной нагрузки  $I_s$ . Связь между  $F_{ts}$  и  $I_s$  показана на рис. 3а. Согласно результатам испытаний, наблюдалась ярко выраженная корреляция между прочностью на изгиб  $F_{ts}$  и параметром  $I_s$ . Логарифмическая функция, которая наилучшим образом соответствует данным, имеет коэффициент корреляции  $R^2 = 0.77$ :

$$F_{ts} = 3.8 \ln I_s + 0.88.$$

Определена линейная зависимость между  $F_{ts}$  и  $W$  (рис. 3б). Для оценки значения прочности на изгиб туфа  $F_{ts}$  с помощью значений  $W$  можно использовать следующее уравнение ( $R^2 = 73$ ):

$$F_{ts} = -0.19W + 7.$$

На рис. 3в показано распределение данных прочности на изгиб  $F_{ts}$  относительно твердости HB туфов. Прочность на изгиб туфа увеличивается с уменьшением твердости по Бринеллю по логарифмической зависимости. Уравнение, описывающее кривую на рис. 3в с коэффициентом корреляции 0.82, имеет вид

$$F_{ts} = 1.38 \ln \text{HB} + 0.57.$$



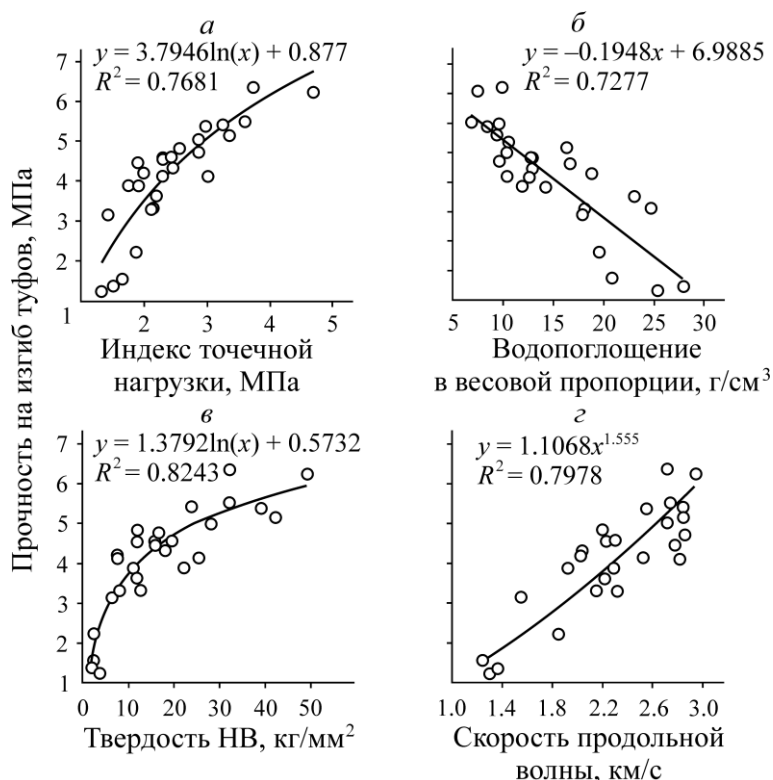


Рис. 3. Зависимость между физическими свойствами и прочностью на изгиб

Прочность на изгиб  $F_{ts}$  (рис. 3г) определялась на основе измеренных значений скорости продольной волны  $V_p$ . Наиболее подходящая взаимосвязь параметров  $F_{ts}$  и  $V_p$  представлена в виде экспоненциальной кривой с коэффициентом корреляции  $R^2 = 0.80$ :

$$F_{ts} = 1.1V_p^{1.55}.$$

*Прогнозирование ударной вязкости  $D_n$ .* Ударная вязкость строительного камня — важная характеристика при его использовании в качестве материала, подверженного ударным нагрузкам, приводящим к разрушению материала. Регрессионный анализ для испытаний на ударную нагрузку выполнен по методике, аналогичной анализу других базовых механических свойств. Определен наиболее высокий корреляционный коэффициент  $R^2$ , равный 0.82, для параметров  $D_n$  и  $I_s$ . Ударная прочность туфов повышается с ростом  $I_s$  логарифмически (рис. 4а), уравнение зависимости имеет вид ( $R^2 = 82$ ):

$$D_n = 10.96 \ln I_s - 1.33.$$

График  $D_n$  как функция  $U_w$  представлен на рис. 4б. Для всех туфов существует линейная зависимость между  $U_w$  и  $D_n$ . Ниже приведено регрессионное уравнение при ( $R^2 = 76$ ):

$$D_n = 16.1U_w - 19.7.$$

Самая высокая корреляция установлена между измеренными параметрами  $D_n$  и НВ (рис. 4в). Значение ударной прочности экспоненциально повышается со снижением НВ туфов; значения  $D_n$  вулканических пород можно определить с учетом измеренных значений НВ ( $R^2 = 90$ ):

$$D_n = 1.35 \text{НВ}^{0.64}.$$

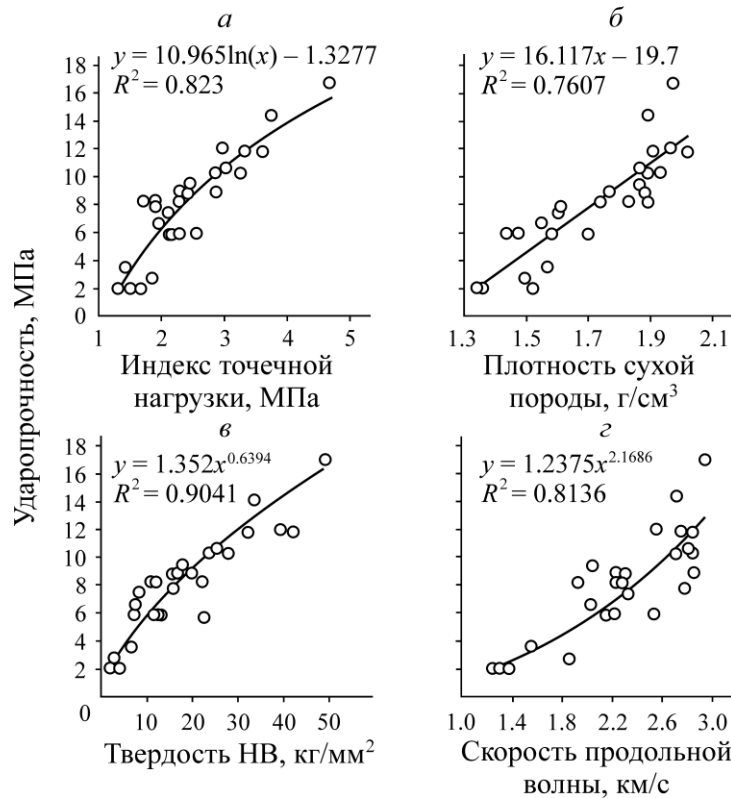


Рис. 4. Зависимость между физическими свойствами и ударной вязкостью

На рис. 4г показана корреляционная зависимость между значениями  $D_n$  и  $V_p$ . Зависимость между этими параметрами подобна экспоненциальной зависимости на рис. 4в. Значение  $D_n$  для туфов можно прогнозировать на основе полученных значений  $V_p$  ( $R^2 = 81$ ):

$$D_n = 1.24V_p^{2.17}.$$

*Прогнозирование величины абразивного износа  $B_{sa}$ .* Разрушение частиц в результате механического воздействия, такого как трение и удар по поверхности строительного камня, может быть описано как абразивный износ, т. е. потеря объема за счет износа. Абразивный износ породы — один из важнейших критериев качества при ее применении в качестве строительного камня. Значения абразивного износа сопоставлены со значениями плотности сухого грунта  $U_w$ , твердости НВ, скорости продольных волн  $V_p$  и индекса точечной нагрузки  $I_s$ .

Отмечена слабо прослеживаемая обратная связь между  $B_{sa}$  и  $I_s$  туфов (рис. 5а). С увеличением точечной нагрузки абразивный износ уменьшается, т. е. сопротивление износу увеличивается с ростом  $I_s$ . Можно установить следующую зависимость с коэффициентом корреляции ( $R^2 = 0.69$ ):

$$B_{sa} = 166.5I_s^{-1.23}.$$

Зависимость абразивного износа  $B_{sa}$  как функции плотности сухого грунта  $U_w$  показана на рис. 5б. Видно, что  $B_{sa}$  имеет обратную зависимость от  $U_w$ , т. е.  $B_{sa}$  уменьшается с увеличением  $U_w$ . Зависимость между параметрами  $B_{sa}$  и  $U_w$  имеет экспоненциальный вид с коэффициентом корреляции  $R^2 = 0.74$ :

$$B_{sa} = 333.0U_w^{-3.3}.$$

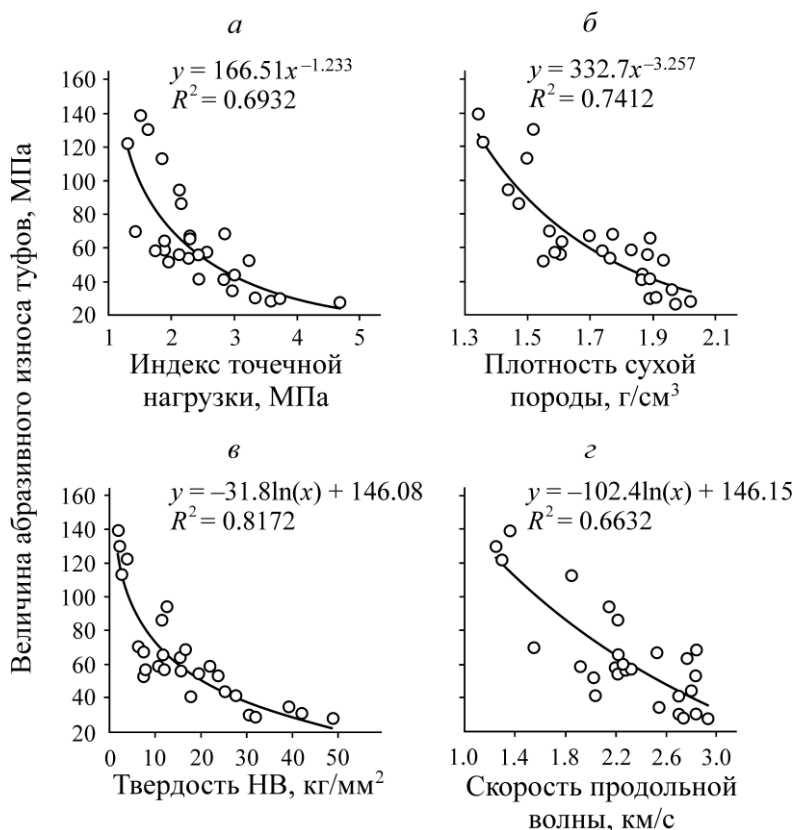


Рис. 5. Зависимость между физическими свойствами и величиной абразивного износа

Рис. 5в показывает взаимосвязь между измеренными значениями абразивного износа  $B_{sa}$  и твердости НВ горных пород. Согласно результатам, полученным для испытуемых туфов, поверхностная твердость туфов с высокой пористостью также мала. Сила, приложенная к поверхности образца при определении твердости НВ, легко объединяет эти поры, так что глубина проникновения шарика становится больше. При увеличении значения пористости уменьшается эффективная площадь поверхности, при этом эффективное абразивное напряжение увеличивается и поверхность легче изнашивается. Однако стойкость к истиранию породы  $B_{sa}$  больше обусловлена минералогией, текстурой, химическим связыванием минералов с кристаллическим кварцем, чем физическими свойствами породы. В результате анализа экспериментов установлена логарифмическая зависимость между значениями НВ и  $B_{sa}$  с коэффициентом корреляции  $R^2 = 82$ :

$$B_{sa} = -31.8 \ln \text{НВ} + 146.$$

Связь между абразивным износом  $B_{sa}$  и скоростью продольных волн  $V_p$  пород показана на рис. 5г. Видно, что параметр  $B_{sa}$  пород увеличивается с уменьшением  $V_p$ . Уравнение, описывающее наилучшее соответствие с коэффициентом корреляции  $R^2 = 0.66$ :

$$B_{sa} = -102.0 \ln V_p + 146.$$

Несмотря на то, что между параметрами  $B_{sa}$  и  $V_p$  существует плохая корреляция  $R^2 = 0.66$ , в [37] установлена нелинейная зависимость с коэффициентом корреляции 0.70, а в [5] — нелинейная связь с коэффициентом корреляции 0.85.

Характеристика  $B_{sa}$  больше связана с минералогией, текстурой, цементирующим агентом и цементным типом (кварцем, кальцитом и глиной), степенью изменения и содержанием кристаллического кварца в породе, чем другие его физические и механические свойства. Другими словами, горная порода с высокими значениями  $U_{cs}$  и  $F_{ts}$  может проявлять низкую стойкость к истиранию. Показано, что корреляции между  $B_{sa}$  и физико-индексными свойствами туфов являются слабыми, а коэффициенты корреляции ниже 0.80, поскольку стойкость к истиранию пород зависит от их минералогии, текстуры, прочности химических связей и содержания кварца. Наибольшее сопротивление имеют породы, содержащие кварц в качестве цементного материала. Породы с преобладанием кальцита и железных минералов в качестве связующих имеют среднюю прочность, а самую низкую прочность — глинистые породы [1].

### ВЫВОДЫ

Для сравнения физических и механических свойств туфов, используемых в качестве строительного камня, проанализировано 27 различных вулканических пород. Согласно результатам испытаний, можно сделать следующие выводы.

Физические свойства существенно влияют на механические свойства туфов. С увеличением значений пористости уменьшаются плотность и прочностные свойства туфов, увеличиваются значения водопоглощения  $W$  и абразивный износ  $B_{sa}$ . Прочность на сжатие  $U_{cs}$ , изгиб  $F_{ts}$  и ударная вязкость  $D_n$  логарифмически уменьшаются с увеличением открытой пористости  $P_a$ , тогда как  $B_{sa}$  нелинейно увеличивается с увеличением открытой пористости  $P_a$  туфов.

Плотность  $U_w$  и водопоглощение  $W$  линейно взаимосвязаны с механическими свойствами породы; прочность на сжатие  $U_{cs}$ , изгиб  $F_{ts}$  и ударная вязкость  $D_n$  породы увеличиваются с увеличением плотности  $U_w$ .

Скорость звука является важным показателем для прогнозирования механических свойств горных пород;  $U_{cs}$ ,  $F_{ts}$  и  $D_n$  линейно связаны со скоростью звука, однако связь между  $B_{sa}$  и  $V_p$  представлена обратной логарифмической функцией с низким коэффициентом корреляции  $R^2 = 0.66$ . Скорости звука в твердых породах определяются с более низкими значениями стандартного отклонения, чем скорости звука в пористых породах. Поскольку туфы, используемые в исследовании, обладают высокой пористостью, коэффициенты корреляции, полученные со скоростью продольной волны  $V_p$ , слабее других параметров.

Индекс точечной нагрузки  $I_s$  — необходимый параметр для прогнозирования основных механических свойств горных пород; значения  $U_{cs}$ ,  $F_{ts}$ ,  $B_{sa}$  и  $D_n$  для туфов должны рассчитываться с использованием этой характеристики. Чем выше индекс точечной нагрузки, тем выше значения  $U_{cs}$ ,  $F_{ts}$  и  $D_n$ . Кроме того, существует сильная корреляционная связь между  $I_s - U_{cs}$  и  $I_s - D_n$  туфов. Коэффициент корреляции  $R^2 > 0.80$ . Однако между  $B_{sa}$  и  $I_s$  обнаружена слабая обратная связь с коэффициентом корреляции 0.69.

Пористая структура туфов вызывает некоторые проблемы при проведении испытаний на износ, так как абразивная пыль быстро заполняет поры. В этом случае сопротивление трения между стальным диском и образцом увеличивается, создавая вибрацию, что приводит к завершению эксперимента. По этой причине прогнозирование характеристик на основе абразивности  $B_{sa}$  имеет низкий коэффициент корреляции.

Установлено, что отношения, полученные на основе твердости по Бринеллю НВ, надежнее, чем корреляции, полученные с другими индексными или физическими параметрами. Хотя эксперимент по вычислению твердости по Бринеллю больше подходит для металлов, его использование по отношению к пористым породам дало неплохие результаты. Основная причина заключается в том, что туфы имеют более пластичную природу, чем многие породы, и сходные свойства в плане структуры и текстуры материала. Отпечаток от вдавливания стальным шариком, оставленный на твердой породе, менее заметен, чем на пористой породе. Можно заключить, что твердость по Бринеллю НВ — мера стойкости горных пород к вдавливанию, напрямую связанная с прочностью горной породы.

Предложенные корреляционные зависимости оценивают свойства однородных и изотропных вулканических пород, поэтому полученные уравнения не рекомендуются для применения по отношению к другим типам пород (метаморфическим, осадочным и микрокристаллическим), имеющим микро- и макротрещины.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Jumikis A. R.** Rock Mechanics, Series on Rock and Soil Mechanics, 1979. — P. 286.
2. **Torabi S. R., Ataei M., and Javanshir M.** Application of Schmidt rebound number for estimating rock strength under specific geological conditions, *J. Min. Envir.*, 2011, Vol. 1, Issue 2. — P. 1–8.
3. **Minaeian B. and Ahangari K.** Estimation of uniaxial compressive strength based on *P*-wave and Schmidt hammer rebound using statistical method, *Arab J. Geosci.*, 2013, Vol. 6, No. 6. — P. 1925–1931.
4. **Jamshidi A., Nikudel M. R., Khomehchiyan M., Sahamieh R. Z., and Abdi Y.** A Correlation between *P*-wave velocity and Schmidt hardness with mechanical properties of travertine building stones, *Arab J. Geosci.*, 2016, Vol. 9, No. 10. — 568 p.
5. **Kılıç A. and Teymen A.** Determination of mechanical properties of rocks using simple methods, *Bull Eng. Geol. Environ.*, 2008, Vol. 67, Issue 2. — P. 237–244.
6. **Sachpazis C. I.** Correlating Schmidt hardness with compressive strength and young's modulus of carbonate rocks, *Bull Int. Assoc. Eng. Geol.*, 1990, Vol. 42, No. 1. — P. 75–83.
7. **Yilmaz I. and Sendir H.** Correlation of Schmidt hardness with unconfined compressive strength and Young's modulus in gypsum from Sivas (Turkey), *Eng. Geol.*, 2002, Vol. 66, Issue 3. — P. 211–219.
8. **Turgul A. and Zarif I. H.** Correlation of mineralogical and textural characteristics with engineering properties of selected granitic rocks from turkey, *Eng. Geol.*, 1999, Vol. 51, No. 4. — P. 303–317.
9. **Bruno G., Vessia G., and Bobbo L.** Statistical method for assessing the uniaxial compressive strength of carbonate rock by Schmidt hammer tests performed on core samples, *Rock Mech. Rock Eng.*, 2013, Vol. 46, Issue 1. — P. 199–206.
10. **Karaman K. and Kesimal A.** A comparative study of Schmidt hammer test methods for estimating the uniaxial compressive strength of rocks, *Bull Eng. Geol. Environ.*, 2015, Vol. 74, No. 2. — P. 507–520.
11. **Yasar E. and Erdogan Y.** Estimation of rock physicomaterial properties using hardness methods, *Eng. Geol.*, 2004, Vol. 71, Issue 3–4. — P. 281–288.
12. **Koncagul E. C. and Santi P. M.** Predicting the unconfined compressive strength of the Brethitt shale using slake durability, shore hardness and rock structural properties, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 1999, Vol. 36, Issue 2. — P. 139–153.
13. **Abd El Aal A. and Kahraman S.** Indirect methods to predict the abrasion resistance and slake durability of marbles, *J. Mol. Eng. Mater.*, 2017, Vol. 5, No. 2, 1750007-6.
14. **Heidari M., Khanlari G. R., Kaveh M. T., and Kargarian S.** Predicting the uniaxial compressive and tensile strengths of gypsum rock by point load testing, *Rock Mech. Rock Eng.*, 2012, Vol. 45, Issue 2. — P. 265–273.

15. **Kahraman S.** Evaluation of simple methods for assessing the uniaxial compressive strength of rock, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 2001, Vol. 38, Issue 7. — P. 981–994.
16. **Singh T. N., Kainthola A., and Venkatesh A.** Correlation between point load index and uniaxial compressive strength for different rock types, *Rock Mech. Rock Eng.*, 2012, Vol. 45, Issue 2. — P. 259–264.
17. **Azimian A., Ajalloeian R., and Fatehi L.** An empirical correlation of uniaxial compressive strength with *P*-wave velocity and point load strength index on marly rocks using statistical method, *Geotech. Geol. Eng.*, 2014, Vol. 32, No. 1. — P. 205–214.
18. **Kahraman S.** The determination of uniaxial compressive strength from point load strength for pyroclastic rocks, *Eng. Geol.*, 2014, Vol. 170. — P. 33–42.
19. **Kaya A. and Karaman K.** Utilizing the strength conversion factor in the estimation of uniaxial compressive strength from the point load index, *Bull Eng. Geol. Environ*, 2016, Vol. 75, No. 1. — P. 341–357.
20. **Singh P. K., Tripathy A., Kainthola A., Singh V., and Singh T. N.** Indirect estimation of compressive and shear strength from simple index tests, *Eng. with Comp.*, 2017, Vol. 33, No. 1. — P. 1–11.
21. **Al-Osta M. A., Ahmad S., Khan A. I., and Algadhib A. H.** Evaluation of unconfined compressive strength of carbonate sedimentary rocks in Saudi Arabia using indirect tests, *Arab. J. Geosci.*, 2018, Vol. 11, Issue 12. — 301 p.
22. **Abbas Abbaszadeh S., Larsson S., and Johansson F.** Updated relations for the uniaxial compressive strength of marlstones based on *P*-wave velocity and point load index test, *Innovative Infrastructure Solutions*, 2016. — P. 1–17.
23. **Kurtuluş C., Sertçelik F., and Sertçelik I.** Correlating physico-mechanical properties of intact rocks with *P*-wave velocity, *Acta Geodaetica et Geophysica*, 2016, Vol. 51, No. 3. — P. 571–582.
24. **Yagiz S.** *P*-wave velocity test for assessment of geotechnical properties of some rock materials, *Bull Mater. Sci.*, 2011, Vol. 34, No. 4. — P. 947–953.
25. **Song I., Suh M., Woo Y. K., and Hao T.** Determination of the elastic modulus of foliated rocks from ultrasonic velocity measurements, *Eng. Geol.*, 2004, Vol. 72, Issue 3–4. — P. 293–308.
26. **Sharma P. K. and Singh T. N.** A correlation between *P*-wave velocity, impact strength index, slake durability index and uniaxial compressive strength, *Bull Eng. Geol. Environ*, 2008, Vol. 67, Issue 1. — P. 17–22.
27. **Diamantis K., Bellas S., Migiros G., and Gartzos E.** Correlating wave velocities with physical, mechanical properties and petrographic characteristics of peridotites from the central Greece, *Geotech. Geol. Eng.*, 2011, Vol. 29, Issue 1. — P. 1049–1062.
28. **Altindag R.** Correlation between *P*-wave velocity and some mechanical properties for sedimentary rocks, *J. S Afr. Inst. Min. Metall.*, 2012, Vol. 112. — P. 229–237.
29. **Khandelwal M.** Correlating *P*-wave velocity with the physico-mechanical properties of different rocks, *Pure Appl. Geophys.*, 2013, Vol. 170. — P. 507–514.
30. **Selçuk L. and Nar A.** Prediction of uniaxial compressive strength of intact rocks using ultrasonic pulse velocity and rebound-hammer number, *Q J. Eng. Geol. Hydrogeol.*, 2016, Vol. 49, No. 1. — P. 67–75.
31. **Boutrid A., Bensehamdi S., and Chaib R.** Investigation into Brinell hardness test applied to rocks, *W J. Eng.*, 2013, Vol. 10, No. 4. — P. 367–380.
32. **Boutrid A., Bensihamdi S., Chettibi M., and Talhi K.** Strength hardness rock testing, *J. Min. Sci.*, 2015, Vol. 51, Issue . — P. 95–110.
33. **Rajabzadeh M. A., Moosavinasab Z., and Rakhshandehroo G.** Effects of rock classes and porosity on the relation between uniaxial compressive strength and some rock properties for carbonate rocks, *Rock Mech. Rock Eng.*, 2012, Vol. 45. — P. 113–122.
34. **Jamshidi A., Zamanian H., and Zarei Sahamieh R.** The effect of density and porosity on the correlation between uniaxial compressive strength and *P*-wave velocity, *Rock Mech. Rock Eng.*, 2018, Vol. 51, No. 4. — P. 1279–1286.

35. **Ercikdi B., Karaman K., Cihangir F., Yılmaz T., Aliyazicioglou S., and Kesimal A.** Core size effect on the dry and saturated ultrasonic pulse velocity of limestone samples, *Ultrasonics*, 2016, Vol. 72. P. 143–149.
36. **Hebib R., Belhai D., and Alloul B.** Estimation of uniaxial compressive strength of North Algeria sedimentary rocks using density, Porosity, and Schmidt Hardness, *Arab. J. Geosci.*, 2017, Vol. 10, Issue 17. — P. 383.
37. **Yavuz H., Ugur I., and Demirdag S.** Abrasion resistance of carbonate rocks used in dimension stone industry and correlations between abrasion and rock properties, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 2007, Vol. 45, Issue 2. — P. 260–267.
38. **Karaca Z., Günes Yılmaz N., and Goktan R. M.** Abrasion wear characterization of some selected stone flooring materials with respect to contact load, *Const. Build Mater.*, 2012, Vol. 36. — P. 520–526.
39. **Goodman R. E.** Introduction to rock mechanics, 2<sup>nd</sup> Edition, New York, Wiley, 1989.
40. **TSE 699.** Methods of testing for natural building stones, Institute of Turkish Standards (TSE), Ankara, Turkey, 1987.
41. **ISRM 2007.** The complete ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring: 1974–2006. Suggested methods prepared by the commission on testing methods, international society for rock mechanics. In: Ulusay R., Hudson J. A. (ed.) Compilation arranged by the ISRM Turkish national group, Ankara, Turkey, 2007.
42. **ASTM C 880-89.** Standard test method for flexural strength of dimensional stone. Annual book of ASTM Standards, Vol. 04.08, ASTM 1916, Race Street. Philadelphia, PA 19103–1187, USA, 1993.
43. **Şentürk A., Gündüz L., Tosun Y. İ., and Saruşık A., and Mermer Teknolojisi S. D.** University, Isparta, Turkey, 1986.
44. **ASTM C 241-90.** Standard test method for abrasion resistance of stone subjected to foot traffic, Annual Book of ASTM Standards, Ame Soc Testing Mater (ASTM), 1990.
45. **DIN 52108.** Wear testing of inorganic, nonmetallic materials using the Bohme abrasive wheel, Deutsches Institut Fur Normung, EV, 2002.
46. **Deere D. U. and Miller R. P.** Engineering classification and index properties for intact rock, Illinois Univ at Urbana Dept of Civil Engineering, 1966.

*Поступила в редакцию 15/X 2018*