

УДК 624.131.4

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА
ЧУНАРСКОГО ПЕСЧАНИКА

Ананд Сингх¹, Амит Кумар Верма², Абхинав Кумар²,
Чандра Шекхар Сингх², Санджай Кумар Рой¹

¹Центральный институт горного дела и топливных исследований,

E-mail: anandsingh@cimfr.nic.in, 826001, г. Дханбад, Индия

²Индийский технологический институт, Индуистский университет Банараса,
221005, г. Варанаси, Индия

Рассмотрено влияние термического воздействия на механические свойства песчаника из области Чунар в Индии (чунарский песчаник). Изучаемый район представлен виндхийской супергруппой от мезо- до неопротерозойской эры. Определены зависимости прочностных характеристик (пределы прочности на растяжение σ_t и одноосное сжатие σ_c) и скорости продольных волн V_p от температуры. Испытания показали, что до 200 °С происходит незначительное повышение σ_t и σ_c , но при температуре выше 200 °С прочность песчаника постепенно уменьшается. Скорость V_p резко уменьшается при температуре выше 400 °С вследствие трещинообразования.

Чунарский песчаник, прочность породы, P-волна, температура

DOI: 10.15372/FTPRPI20230106

Несколько веков назад люди строили дома из дерева. В связи с пожарами и другими природными бедствиями здания стали возводить из более прочных материалов (кирпича, бетона, песчаника и др.). Изменение физических свойств камня при пожарах является дискуссионным вопросом ввиду постоянного повышения температуры окружающей среды. Песчаник — наиболее распространенный материал для строительства монументов и памятников исторического наследия. В Индии из него построены многие монументы и здания (храм Рамешварам, Парламент и др.). Наиболее известные места в мире, где можно встретить песчаник, — Белый Дом в США и гора Улуру в Австралии — самое большое окаменелое образование [1, 2].

До начала возведения зданий и сооружений каменные строительные материалы и породы необходимо исследовать для оценки изменения прочностных свойств при термическом воздействии. Данный анализ весьма востребован, за последние годы выполнен ряд экспериментальных исследований по изучению свойств горных пород при термомеханическом воздействии [3–6]. Исследователи заинтересованы в изучении возможности ослабления или упрочнения породы за счет изменения температуры. По-видимому, впервые термическое влияние на породу изучено на примере обжига каолина и глины [7].

При подземной разработке месторождений на больших глубинах устойчивость пород зависит от прочности на растяжение. При действии повышенных температур прочностные свойства породы значительно меняются. В [8, 9] изучено развитие микроструктурных характеристик посредством анализа сигналов акустической эмиссии. Это позволило оценить влияние изменения температуры на прочностные свойства породы, а также установить факт роста уже существующих и образования новых трещин, помимо термического расширения [10].

В [11] установлено, что повышенное термическое воздействие изменяет кристаллическую и морфологическую структуру породы. Критическую роль в исследовании метаморфических изменений в породе оказывает скорость нагрева [12]. С увеличением температуры жесткость породы снижается [13]. Термическое расширение зерен минералов разного размера способствует образованию микротрещин, приводя к образованию анизотропии каждого минерала и внутриверновых микротрещин [14]. Из-за наличия областей термальных напряжений происходит расширение или сжатие микроструктурных элементов породы, в результате чего она теряет свою жесткость [15]. С повышением температуры в геосреде наблюдается переход свойств породы от упругости к пластичности, ее поведение меняется от зоны пластической деформации к зоне деформации хрупкого сдвига [16]. Новые микротрещины образуются только тогда, когда термическое воздействие на породу вызывает превышение пиковой прочности, что объясняется ослаблением когезионного взаимодействия между зернами минерала с увеличением температуры геосреды [17]. Под нагрузкой микротрещины закрываются, порода деформируется упруго. При увеличении температуры влага, находящаяся в порах породы, испаряется и под воздействием механической нагрузки трещины сжимаются, увеличивается плотность породы. В механике повреждений восстановление прочности на сжатие при закрытой трещине называется односторонним состоянием, т. е. у пород, находящихся под повышенным термическим воздействием, увеличивается резистивная прочность в несколько раз с одновременным уменьшением пластичности, но затем данная прочность снижается [18].

Генерация P -волн позволяет оценить некоторые физические свойства пород и состояние массива и осуществляется, в частности, с целью выявления нарушений сплошности [19]. Скорость распространения P -волны V_p в породе прямо пропорциональна плотности и обратно пропорциональна пористости [20–25].

Цель настоящей работы — определение влияния термического воздействия на физические свойства песчаника из области Чунар (район Мирзапур, штат Уттар-Прадеш, Индия). В испытаниях при температурах $T = 25 - 500$ °C у образцов чунарского песчаника определялись прочности на одноосное сжатие σ_c и растяжение σ_t , плотность и скорость V_p .

РАССМАТРИВАЕМАЯ ОБЛАСТЬ И ЕЕ ГЕОЛОГИЯ

Город Чунар расположен в горном массиве Виндхья на расстоянии 273 км от столицы штата г. Лакхнау, с левой стороны ограничен рекой Ганг, с правой — Джарго. Координаты рассматриваемой области: $24^{\circ}57'54''$ и $25^{\circ}06'50''$ с. ш. и $82^{\circ}50'23''$ и $83^{\circ}04'22''$ в. д. (рис. 1). С геологической точки зрения рассматриваемая область принадлежит супергруппе Виндхья от мезозойской до неопротерозойской эры. В нее входят формации сланца с пологим углом падения, карбоната и песчаника с вулканическими основаниями, а также несколько конгломератов, разделенных локальными и региональными несогласиями [26]. Региональное несогласие заметно в нижней части группы Каймур, разделяющей супергруппу на верхнюю Виндхью (группы Ре-

ва, Бхандер и Каймур) и нижнюю (Семри). Структура обнажения Виндхья синклинальная. Согласно [27], Виндхья является внутрикратонным бассейном, возникшим в результате воздействия тектонических напряжений на внутреннюю плиту. Группа Каймур занимает значительную долю в супергруппе Виндхья из-за доминирующих кварцевых обломочных пород, залегающих поверх Семри, и состоит из богатых карбонатных пород.

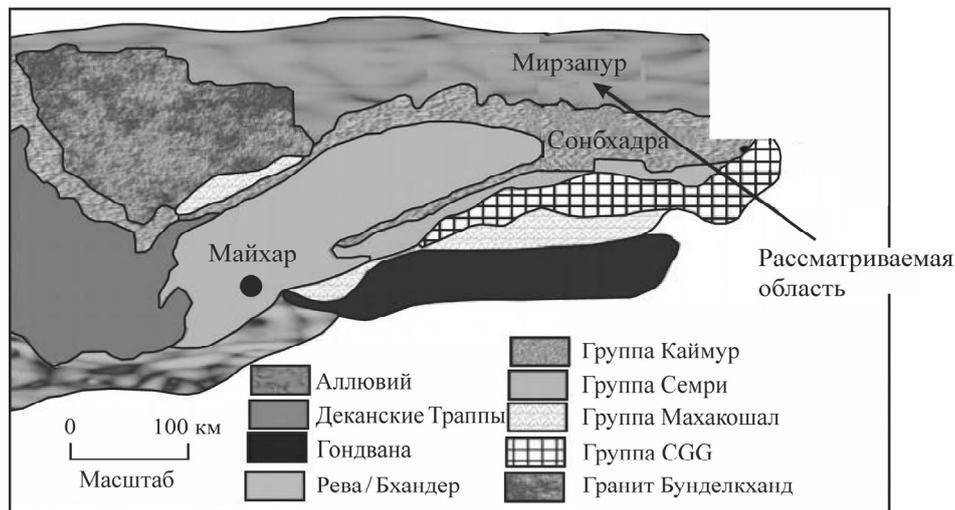


Рис. 1. Геологическая карта рассматриваемой области

ЛАБОРАТОРНЫЕ ИСПЫТАНИЯ

Чунарский песчаник имеет темно-желтый или красноватый цвет, среднюю и мелкую зернистость (0.06–0.25 мм), высокую твердость. Он широко использовался при строительстве Львиной капители, колонн Ашоки в музее Сарнатха, фортов Чунар и Рамнагар, гхатов Варанаси и статуи Будды во вьетнамском храме.

Согласно стандартам ISMR [28], образцы цилиндрической формы выбуривались из блоков чунарского песчаника и просушивались на открытом воздухе 7 сут. Скорость нагружения образцов в ходе испытаний также регламентировалась стандартами ISRM. Соотношение длины образцов к диаметру составляло 2.0:2.5, торцы образцов были плоскими и параллельны друг другу. Всего подготовлено 30 образцов диаметром 50 мм и высотой 110 мм, которые разделили на шесть групп по пять в каждой. Для испытания прочности на растяжение подготовили образцы в форме диска толщиной 25 мм. Перед испытаниями для исключения дефектных образцов замерялась скорость V_p .

Образцы песчаника равномерно нагревались в электрической муфельной печи 8 ч при скорости нагрева 1.5 °C/c до температур $T=25, 100, 200, 300, 400$ и 500 °C. Резкое повышение температуры печи может изменить метаморфические свойства породы, поэтому для равномерного распределения тепла по образцу должна поддерживаться низкая скорость нагрева (менее 6 °C/c) [29]. После нагрева при требуемой температуре образцы оставались в печи и медленно охлаждались. Низкая скорость нагрева и охлаждения необходимы для того, чтобы образование микротрещин и иных дефектов в образцах обуславливалось только влиянием температуры, а не большим температурным градиентом. После термического воздействия измерялись геометрические размеры образцов.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Перед началом термического воздействия пять образцов из разных групп испытывались при комнатной температуре 25 °С и определялись их физические свойства. Плотность находилась в диапазоне 2.40–2.66 г/см³ со среднеквадратичным отклонением (СКО 0.099 г/см³), скорость V_p — 3258–3601 м/с (СКО 135.509 м/с), прочность на одноосное сжатие — 83.30–75.40 МПа (СКО 3.135 МПа), прочность на растяжение — 8.38–9.26 МПа (СКО 0.48 МПа). Свойства песчаника при $T=25$ °С следующие: плотность 2.528 г/см³, $V_p=3428$ м/с, $\sigma_c=79.30$ МПа, $\sigma_t=8.81$ МПа. Далее образцы в электрической муфельной печи подвергались термическому воздействию при $T=100, 200, 300, 400$ и 500 °С.

Влияние температуры на прочность песчаника при одноосном сжатии. Испытания выполнялись на пяти образцах разных групп для каждой температуры и определялись средние прочности на одноосное сжатие (табл. 1). При $T=100, 200, 300, 400$ и 500 °С она составила 81.40–89.90, 85.70–94.80, 79.90–88.40, 77.44–85.58 и 75.22–83.14 МПа соответственно, СКО — 3.383, 3.565, 3.324, 3.220 и 3.128 МПа соответственно.

ТАБЛИЦА 1. Прочность образцов песчаника на одноосное сжатие σ_c при разной температуре

Группа образцов	Температура, °С	Прочность при сжатии σ_c , МПа
1	25	79.30
2	100	85.60
3	200	90.20
4	300	84.10
5	400	81.46
6	500	79.13

При увеличении температуры с 25 до 200 °С прочность песчаника растет почти линейно. При $T=200–500$ °С она значительно снижается, так как минералы, входящие в состав песчаника, распадаются и образуются микроструктурные повреждения, т. е. снижение прочности происходит из-за усадки пор, повышения плотности песчаника, что снижает его способность сопротивляться любым деформациям. При $T=25–200$ °С среднее повышение прочности составило 13.74%, при $T=200–500$ °С среднее ее снижение — 12.27%. Изменение прочности песчаника при одноосном сжатии от начального значения (79.30 МПа при 25 °С) относительно температуры показано на рис. 2.

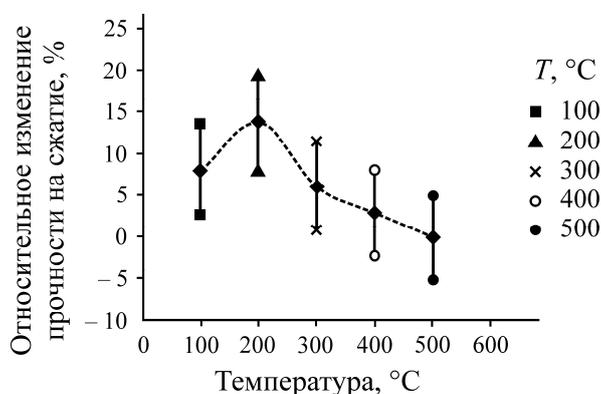


Рис. 2. Изменение прочности песчаника в зависимости от термического воздействия

Повышение прочности при $T=25-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ обусловлено испарением влаги, содержащейся в порах песчаника, и тем, что сухой воздух снижает скольжение между микротрещинами [30]. Уменьшение прочности при одноосном сжатии после $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ связано с образованием дефектов и микротрещин на микроскопическом уровне.

Влияние температуры на прочность песчаника при растяжении. Испытания выполнены на пяти образцах каждой группы для каждой температуры и определены средние прочности на растяжение σ_t (табл. 2). Установлено, что прочность песчаника на растяжение зависит от температуры: при $T=100, 200, 300, 400$ и $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ она составила $9.04-9.99, 9.62-10.63, 8.73-9.64, 8.31-9.18$ и $7.83-8.66$ МПа соответственно, СКО — $0.375, 0.400, 0.362, 0.345$ и 0.325 МПа соответственно.

ТАБЛИЦА 2. Прочность образцов песчаника на растяжение σ_t при разной температуре

Группа образцов	Температура, $^{\circ}\text{C}$	Прочность на растяжение σ_t , МПа
1	25	8.81
2	100	9.51
3	200	10.12
4	300	9.18
5	400	8.74
6	500	8.24

При $T=25-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ прочность на растяжение повышается из-за наличия сухого воздуха в порах песчаника, что увеличивает сцепление между его частицами. После $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ образуются микроструктурные дефекты и микротрещины, прочность песчаника σ_t снижается. Изменение прочности на растяжение в зависимости от температуры показано на рис. 3. В диапазоне $T=200-500\text{ }^{\circ}\text{C}$ наблюдается резкое понижение прочности на растяжение при $T=25\text{ }^{\circ}\text{C}$. Относительное увеличение прочности на растяжение при $25-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ составило 14.87% , снижение при $T=200-500\text{ }^{\circ}\text{C}$ — 18.58% . Температурное воздействие меняет структуру входящих в состав песчаника минералов и приводит к образованию дефектов, поэтому резко снижается механическая прочность образцов.

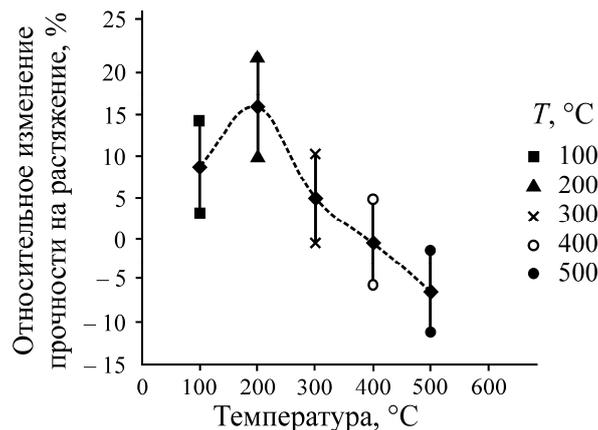


Рис. 3. Изменение прочности песчаника в зависимости от термического воздействия

Влияние температуры на плотность песчаника. Изучалось влияние термического воздействия на плотность образцов песчаника (табл. 3). Плотность рассчитывалась для каждой температуры: при $T=100, 200, 300, 400$ и $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ она менялась в диапазонах $2.320-2.565, 2.237-2.472, 2.225-2.460, 2.208-2.441$ и $2.024-2.237$ г/см³ соответственно, СКО для этих температур — $0.096, 0.093, 0.092, 0.091$ и 0.084 г/см³ соответственно.

ТАБЛИЦА 3. Плотность образцов песчаника в зависимости от термического воздействия

Группа образцов	Температура, °С	Плотность, г/см ³
1	25	2.528
2	100	2.441
3	200	2.353
4	300	2.341
5	400	2.323
6	500	2.129

На рис. 4 приведено изменение плотности песчаника в зависимости от температуры. Она обратно пропорциональна температуре: до $T=200$ °С резко падает, при $T=200-400$ °С практически не меняется, после отметки 400 °С вновь резко падает. При $T=25-500$ °С плотность снизилась на 16.01 %. Снижение массы обусловлено испарением влаги из пор песчаника, увеличение объема — температурным расширением.

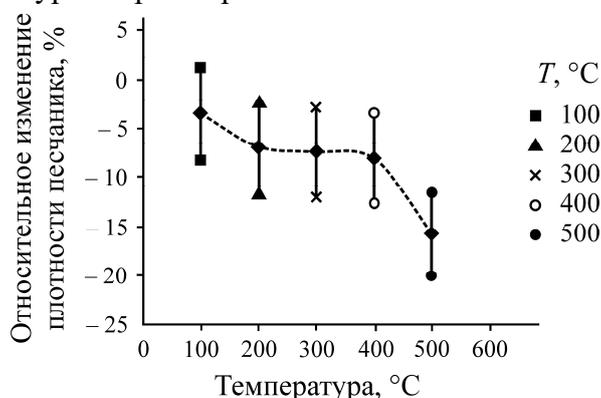


Рис. 4. Изменение плотности песчаника в зависимости от термического воздействия

Влияние температуры на скорость распространения P-волны. Скорость распространения P-волн в образцах песчаника после термического воздействия определялась согласно стандартам ISRM. В песчанике она измерялась на цилиндрических образцах диаметром 25 и 35 мм с помощью установки Ultrasonix concrete tester (UX 4600/4600L). Излучатель ультразвука, изготовленный из крайне чувствительного к напряжению пьезоэлектрического материала, был покрыт защитным слоем из латуни и алюминия. Скорость P-волны измерялась при резонансной частоте 20–200 кГц (табл. 4). Генерировались повторяющиеся импульсы с частотой 30 имп./с. При $T=100, 200, 300, 400$ и 500 °С скорость P-волны менялась в диапазонах 3157–3489, 3058–3379, 2969–3281, 2836–3134 и 2030–2244 м/с соответственно, СКО для данных температур — 131.28, 127.17, 123.45, 117.92 и 84.44 м/с соответственно.

ТАБЛИЦА 4. Скорость распространения P-волны в зависимости от термического воздействия

Группа образцов	Температура, °С	Скорость P-волны, м/с
1	25	3428
2	100	3321
3	200	3217
4	300	3123
5	400	2983
6	500	2136

На рис. 5 показано изменение скорости P -волны относительно температуры: при $T=25-400\text{ }^\circ\text{C}$ она почти линейно снижается, после $T=400\text{ }^\circ\text{C}$ резко падает. Выявлено, что относительное снижение скорости P -волны в диапазоне $25-500\text{ }^\circ\text{C}$ составило 38.4% . Это связано с развитием микротрещин в песчанике после термического воздействия. При $T=25-400\text{ }^\circ\text{C}$ влага, содержащаяся в порах песчаника, преобразуется в пар и покидает их. Резкое снижение скорости P -волны при $T=400-500\text{ }^\circ\text{C}$ обусловлено образованием термического напряжения, приводящего к расширению частиц песчаника и развитию новых микротрещин в областях слабой их цементации [31]. Развивающиеся термальные трещины препятствуют распространению P -волны в среде.

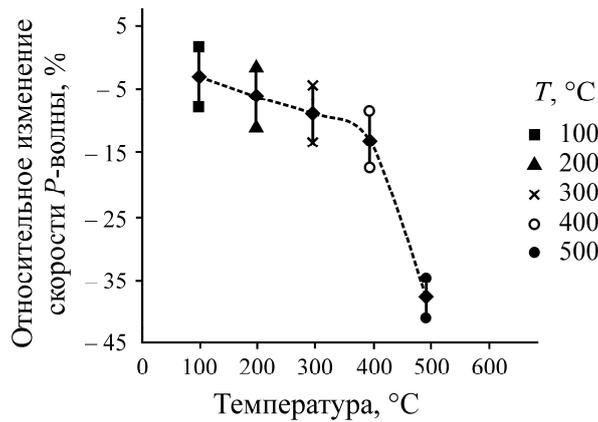


Рис. 5. Изменение скорости распространения P -волны в образцах песчаника в зависимости от термического воздействия

Изменение скорости P -волны позволяет косвенно оценить изменение различных механических свойств после термического воздействия. Для этого введен фактор повреждения:

$$D = 1 - \left(\frac{V_{PT}}{V_p} \right)^2,$$

где V_p , V_{PT} — скорость распространения P -волны при комнатной температуре $T=25\text{ }^\circ\text{C}$ и при определенной температуре термического воздействия [30].

На рис. 6 приведена зависимость фактора повреждения образцов песчаника от температуры.

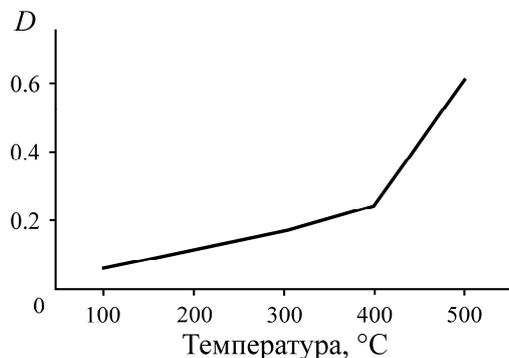


Рис. 6. Зависимость фактора повреждения образцов песчаника от термического воздействия

Термическое воздействие повышает фактор повреждения, так как способствует развитию дефектов и микротрещин в образце, из-за которых постепенно снижаются скорости распространения P -волны. Дефекты и микротрещины увеличивают объем образца и снижают его плотность. На рис. 4, 5 наблюдается одинаковый тренд при термическом воздействии ($T=400-500\text{ }^{\circ}\text{C}$) на образцы песчаника.

ВЫВОДЫ

Прочность песчаника на одноосное сжатие линейно увеличивается при повышении температуры с 25 до $200\text{ }^{\circ}\text{C}$, затем при $T=200-500\text{ }^{\circ}\text{C}$ резко падает. Увеличение прочности обусловлено испарением влаги с пор песчаника. После преодоления температуры $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ зерна песчаника расширяются и прочностные свойства снижаются.

Прочность песчаника на растяжение увеличивается при $T=25-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ и снижается при $T=200-500\text{ }^{\circ}\text{C}$. Ключевой фактор повышения прочностных свойств песчаника — содержание влаги, тогда как после $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ ключевой фактор снижения его прочности — тепловое расширение. При нагреве песчаника резко снижается его плотность, что объясняется испарением влаги из пор. При повышении температуры с 25 до $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ относительное снижение плотности составило 16.01% . Скорость распространения P -волны до температуры $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ медленно уменьшалась, после $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ резко упала, что объясняется развитием термальных трещин в образце. Снижение скорости P -волны обратно пропорционально фактору повреждения образца.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Fitzner B., Heinrichs K., and La Bouchardiere D.** Weathering damage on Pharaonic sandstone monuments in Luxor-Egypt, *Buil. Env.*, 2003, Vol. 38, No. 9-10. — P. 1089–1103.
2. **Dorn R. I.** Boulder weathering and erosion associated with a wildfire, Sierra Ancha Mountains, Arizona. *Geomorph.*, 2003, Vol. 55, No. 1-4. — P. 155–171.
3. **Zhu C. and Arson C.** A thermo-mechanical damage model for rock stiffness during anisotropic crack opening and closure, *Acta Geotechnica*, 2014, Vol. 9, No. 5. — P. 847–867.
4. **Jaeger J. C., Cook N. G., and Zimmerman R.** Fundamentals of rock mechanics, John Wiley & Sons, 2009.
5. **Tian H., Kempka T., Xu N. X., and Ziegler M.** Physical properties of sandstones after high temperature treatment, *J. Rock Mech. Rock Eng.*, 2012, Vol. 45, No. 6. — P. 1113–1117.
6. **Dwivedi R. D., Goel R. K., Prasad V. V. R., and Sinha A.** Thermo-mechanical properties of Indian and other granites, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 2008, Vol. 45, No. 3. — P. 303–315.
7. **Dmitriyev A. P.** Physical properties of rocks at high temperatures, National Aeronautics and Space Administration, 1972, Vol. 684.
8. **Huang Y. H., Yang S. Q., Tian W. L., Zhao J., Ma D., and Zhang C. S.** Physical and mechanical behavior of granite containing pre-existing holes after high temperature treatment, *Archives Civil Mech. Eng.*, 2017, Vol. 17, No. 4. — P. 912–925.
9. **Yang S. Q., Ranjith P. G., Jing H. W., Tian W. L., and Ju Y.** An experimental investigation on thermal damage and failure mechanical behavior of granite after exposure to different high temperature treatments, *Geothermics*, 2017, Vol. 65. — P. 180–197.
10. **Yin T., Li X., Cao W., and Xia K.** Effects of thermal treatment on tensile strength of Laurentian granite using Brazilian test, *Rock Mech. Rock Eng.*, 2015, Vol. 48, No. 6. — P. 2213–2223.

11. **Domanski M. and Webb J.** A review of heat treatment research, *Lithic Technol.*, 2007. — P. 153–194.
12. **Hajpal M.** Changes in sandstones of historical monuments exposed to fire or high temperature, *Fire Technol.*, 2002, Vol. 38, No. 4. — P. 373–382.
13. **Lion M., Skoczylas F., and Ledesert B.** Effects of heating on the hydraulic and poroelastic properties of Bourgogne limestone, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 2005, Vol. 42, No. 4. — P. 508–520.
14. **Griffiths L., Heap M. J., Baud P., and Schmittbuhl J.** Quantification of microcrack characteristics and implications for stiffness and strength of granite, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 2017, Vol. 100. — P. 138–150.
15. **Heuze F. E.** (1983) High-temperature mechanical, physical and thermal properties of granitic rocks — a review, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr.*, 1983, Vol. 20, No. 1. — P. 3–10.
16. **Xu X., Gao F., Shen X., and Xie H.** Mechanical characteristics and microcosmic mechanisms of granite under temperature loads, *J. Chin Univ. Min. Tech.*, 2008, Vol. 18. — P. 413–417.
17. **Zhang L., Mao X., Liu R., Guo X., and Ma D.** The mechanical properties of mudstone at high temperatures: an experimental study, *J. Rock Mech. Rock Eng.*, 2014, Vol. 47. — P. 1479–1484.
18. **Cheng Z. and Arson C.** A thermo-mechanical damage model for rock stiffness during anisotropic crack opening and closure, *Acta Geotech.*, 2014, Vol. 9. — P. 847–867.
19. **Singh C. S. and Shrivastva B. K.** Study of P&S wave velocities in chunar sandstone, *Int. J. Earth Sci. Eng.*, 2006. — P. 512–519.
20. **Soroush H., Qutob H., Oil W., and Me T.** Evaluation of rock properties using ultrasonic pulse technique and correlating static to dynamic elastic constants, *Proc. of the 2nd South Asian Geoscience Conf. and Exhibition (GEOIndia 2011)*, 2011, New Delhi, India.
21. **Sarkar K., Vishal V., and Singh T. N.** An empirical correlation of index geomechanical parameters with the compressional wave velocity, *Geotech. Geol. Eng.*, 2012, Vol. 30, No. 2. — P. 469–479.
22. **Kassab M. A. and Weller A.** Study on *P*-wave and *S*-wave velocity in dry and wet sandstones of Tushka region, Egypt, *Egyptian J. Petroleum*, 2015, Vol. 24, No. 1. — P. 1–11.
23. **Parent T., Domede N., Sellier A., and Mouatt L.** Mechanical characterization of limestone from sound velocity measurement, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 2015, Vol. 79. — P. 149–156.
24. **Kurtulus C., Cakir S., and Yoğurtcuoğlu A.** Ultrasound study of limestone rock physical and mechanical properties, *Soil Mechan. Foundation Eng.*, 2016, Vol. 52, No. 6.
25. **Al-Dousari M., Garrouch A. A., and Al-Omair O.** Investigating the dependence of shear wave velocity on petrophysical parameters, *J. Petroleum Sci. Eng.*, 2016, Vol. 146. — P. 286–296.
26. **Bhattacharyya A.** Recent advances in Vindhyan geology, *Geol. Soc. India Memoir*, 1996, Vol. 36. — P. 331.
27. **Bose P. K., Sarkar S., Chakrabarty S., and Banerjee S.** Overview of meso to neoproterozoic evolution of the Vindhyan basin, Central India. *J. Sediment. Geol.*, 2001, Vol. 142. — P. 395–419.
28. **ISRM.** Suggested methods for determining the uniaxial compressive strength and deformability of rock materials, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr.*, 1979, Vol. 16. — P. 135–140.
29. **Yavuz H., Demirdag S., and Caran S.** Thermal effect on the physical properties of carbonate rocks, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 2010, Vol. 47, No. 1. — P. 94–103.
30. **Pappalardo G., Punturo R., Mineo S., and Contrafatto L.** The role of porosity on the engineering geological properties of 1669 lavas from Mount Etna, *Engineering Geology*, 2017, Vol. 221. — P. 16–28.
31. **Somerton W. H.** Thermal properties and temperature-related behavior of rock/fluid systems, Elsevier, Amsterdam, 1992.

Поступила в редакцию 05/V 2022
После доработки 27/XII 2022
Принята к публикации 19/I 2023