

УДК 622.831

**ВЛИЯНИЕ ТЕПЛООВОГО УДАРА НА ПРОЧНОСТНЫЕ СВОЙСТВА  
ГОРНЫХ ПОРОД: ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ  
ТЕРМИЧЕСКОЙ УСТАЛОСТНОЙ ПРОЧНОСТИ****Н.В. Липатов***Тюменский государственный университет  
ООО «Корэстест сервис»*

В исследовании различные горные породы были нагреты для повышения значений до температуры 250 °С, для определения значений потери прочности и изменения физических свойств, при термических циклах. В результате термических напряжений возникают микротрещины или видимые макротрещины, которые приводят к заметным потерям прочности в зависимости от различных факторов, таких как температура, продолжительность нагрева, детали охлаждения и некоторые свойства породы, такие как минералогический состав, размер зерна, пористость, микротрещины перед нагревом, процесс [2, 5]. Причина потери прочности при нагревании и охлаждении, вариации деформации различных минералов вызывают растрескивание в контактах минералов и распространение существующих трещин.

Эта ситуация вызывает физическое выветривание горных материалов. Кроме того, следует отметить химическое выветривание при высоких температурах как одну из основных причин потери прочности из-за тепловых изменений. При физическом выветривании минералогический состав горных пород и уровень температуры являются определяющими параметрами для химического выветривания. Поскольку температуры в этом исследовании, как правило, не являются критическими для начала химического выветривания, в исследовании основное внимание уделялось физическому выветриванию, а не химическому.

*Ключевые слова:* тепловой удар, прочностные свойства, горные породы, термическая прочность, усталостная прочность.

DOI: 10.17212/1727-2769-2020-4-32-40

**Введение**

Температура – хорошо известный фактор, который существенно меняет прочностные свойства и деформируемость горных пород. Значения прочности на сжатие и растяжение уменьшаются с повышением температуры. Породы значительно расширяются и размягчаются при сильном нагреве, что также является причиной потери прочности и уменьшения значений модуля упругости.

Поскольку породы состоят из минералов с разным тепловым расширением, растяжение и сжатие породы различается. Изменение температуры вызывает напряжение между минеральными зёрнами, что приводит к образованию микротрещин. В зависимости от температуры нагрева охлажденные горные породы могут сохранять свои значения прочности. Также горные породы пластически деформируются с образованием микротрещин после охлаждения в результате высоких уровней термической деформации.

Количество термических циклов является важным параметром для пластической деформации после охлаждения и потери прочности из-за термических напряжений [4, 6]. Для многих горных пород уровни термической деформации могут быть намного выше, чем уровни механической деформации до нагрева,

и заметное разупрочнение, которое приводит к значительному изменению свойств деформируемости, наблюдается при различных температурах, например, выше 250 °С. При увеличении скорости охлаждения вероятность появления крупных трещин увеличивается по сравнению со случаем медленного охлаждения. Значения температуры и теплоемкости охлаждающей среды изменяют скорость охлаждения и охлаждающее влияние на образование трещин [3].

Основной целью данной работы является проведение экспериментальных исследований горных пород на пористость, деформацию и прочностные свойства после теплового удара.

Задачи, необходимые для реализации этой цели:

- 1) значения деформации с увеличением числа тепловых циклов при одном и том же изменении температуры;
- 2) изменение теплоемкости испытуемых образцов при охлаждении водой и воздухом;
- 3) изменение значений прочности на одноосное сжатие при различных условиях охлаждения.

### 1. Материалы и методы

В исследовании было испытано шестьдесят образцов керна, такие как известняк, песчаник, кальцит, карбонат и доломит. Различные горные породы были использованы в испытаниях для определения термических деформаций при различных температурах, способности обрабатывать термическую деформацию, времени охлаждения, изменений значений пористости и потери прочности. Согласно предложениям Международного общества механиков горных пород и инженеров горных пород (ISRM), использовались корончатые фрезы диаметром 54,7 мм, и все образцы керна горных пород были выбурены с одинаковым отношением длины к диаметру (с помощью пильных станков (рис. 1)). Торцы кернов горных пород были сглажены и сделаны перпендикулярно оси образца с точностью 0,05 мм.

Скорость нагрузки была равной 0,5 МПа/с, а гидравлический пресс с максимальной грузоподъемностью 300 кН был использован в испытании на одноосное сжатие UCS (рис. 2).

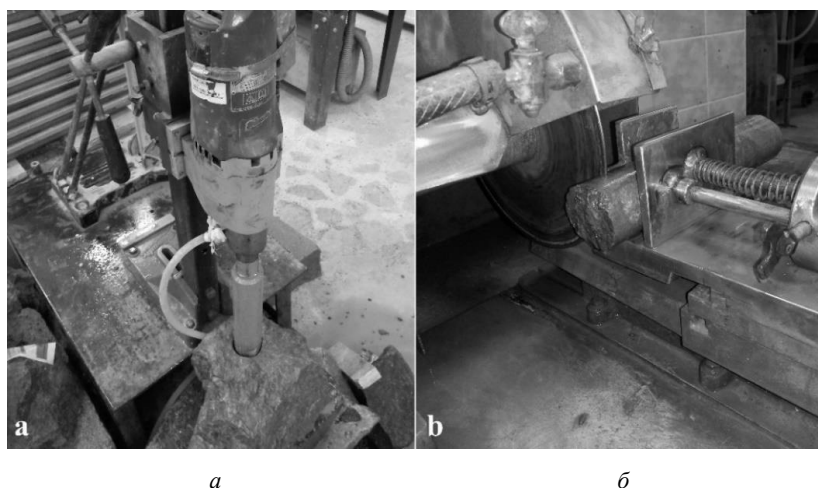


Рис. 1 – Бурение горных пород (а); резка керна с помощью пилы (б)

Fig. 1 – Drilling rocks (a); cutting the core with a saw (b)



Рис. 2 – Испытание на одноосное сжатие UCS

Fig. 2 – UCS uniaxial compression test

Для определения кажущейся пористости образцы керна погружали в воду на сутки для насыщения [1]. После того как образцы были извлечены из емкости с водой, их поверхности сушили, осторожно протирая тканью. Образцы были взвешены с помощью цифровых весов с чувствительностью 0,01 г. После определения веса насыщенных пород образцы керна помещали в печь с температурой 105 °С, где была произведена сушка в течение 24 часов, затем определяли сухую массу для оценки веса испарившейся воды и объема пустот. Для точного расчета объемов образцов, длина и диаметр каждого из образцов керна горных пород были измерены отдельно с помощью цифрового штангенциркуля. Следуя методу, предложенному ISRM, пористость образцов керна горных пород тщательно определялась до и после циклов нагрева. Испытательная среда и оборудование, используемые для испытаний на пористость, показаны на рис. 3.

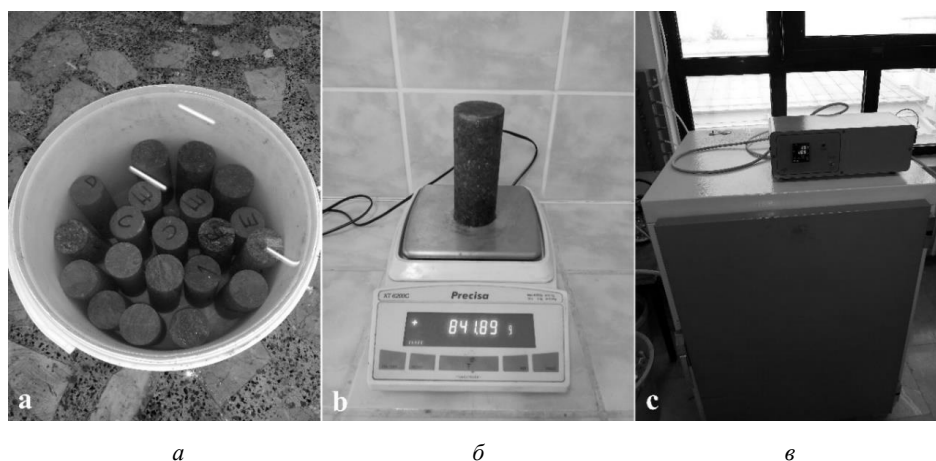


Рис. 3 – Испытание на пористость:

*a* – насыщение образцов водой; *б* – взвешивание; *в* – печь

Fig. 3 – Porosity test:

*a* – saturation of samples with water; *b* – weighing; *c* – oven

Процедура изменения температуры для циклов нагрева приведена в табл. 1. В исследовании были рассмотрены два различных процесса охлаждения: охлаждение в атмосферных условиях и охлаждение в воде для сравнения различных охлаждающих сред.

Процедура изменения температуры была одинаковой для образцов, охлажденных как на воздухе, так и в воде, которые после охлаждения нагревали в печи.

Таблица 1/Table 1

**Процедура термического изменения**  
**Thermal change procedure**

Номер цикла	Температура перед нагревом, °C	Температура нагрева, °C	Температура после нагрева, °C
1	20	120	20
2	20	170	20
3	20	220	20
4	0	250	20
5	-50	250	20

## 2. Охлаждение в морозильной камере

Для процессов нагрева и охлаждения используется печь с максимальной температурой 260 °C и морозильной камерой с минимальной температурой -60 °C. Всего было применено пять циклов, включая 17-часовое нагревание в печи и стадии охлаждения в каждом цикле. Охлаждение образцов производилось при комнатной температуре в лаборатории (~20 °C). Кроме того, в четвертом и пятом циклах образцы соответственно охлаждались до 0 °C (четвертый цикл) и -50 °C (пятый цикл), перед процессами нагрева до 250 °C в печи. Продолжительность стадии охлаждения в четвертом и пятом циклах составила 2 часа после охлаждения при комнатной температуре. В каждом цикле нагрева изменение температуры увеличивалось на 50 °C по сравнению с предыдущим. На последнем этапе образцы были взяты при температуре -50 °C и подвергались повышенной температуре на 250 °C (рис. 4).



Рис. 4 – Холодильная камера и печь в лаборатории (а); измерение деформации охлаждения с помощью индикатора часового типа (б)

Fig. 4 – cold room and oven in the laboratory (a); measurement of the cooling deformation with a dial indicator (b)

После каждого процесса нагрева деформации образцов во время охлаждения на воздухе при комнатной температуре измерялись с помощью индикатора часового типа, как показано на рис. 4, б. После извлечения образца из печи потребовалось всего несколько секунд, чтобы начать измерение деформации. Укорочение

деформации при охлаждении считывали и отмечали изменения во времени. Следует отметить, что одни и те же образцы были испытаны при измерениях деформации после процессов нагрева, чтобы иметь возможность точно сравнивать изменения, вызванные тепловыми циклами. После завершения измерения деформации образцы выдерживали при комнатной температуре до начала следующего термического процесса. В целом, для 20 образцов керна были применены термические циклы в условиях охлаждения на воздухе.

После последнего термического цикла было проведено испытание на прочность при одноосном сжатии (UCS), чтобы оценить влияние нагрева-охлаждения на свойство потери прочности. Кроме того, испытание USC на других 20 образцах керна было выполнено без применения термических процессов для определения значений прочности горных пород перед нагревом и потерь прочности из-за термических циклов. Образцы горных пород, использованные в этом исследовании, были тщательно отобраны после визуальных наблюдений для проверки образцов керна на отсутствие, трещин, стыков заполнения и т. д.

### 3. Охлаждение в воде

Для охлаждения использовалась дистиллированная вода комнатной температуры. Процедура нагрева образцов, охлажденных в воде, была такой же, как и у образцов, охлажденных на воздухе. Процедура, приведенная в табл. 1, применялась для обоих условий охлаждения. Образцы помещали в ведра с водой для охлаждения на 30 минут, позже образцы стояли на воздухе почти 6,5 часов для следующего термического процесса перед вторым и третьим тепловыми циклами. Поскольку продолжительность процесса охлаждения печи составляла 2 часа, образцы выдерживали на воздухе при комнатной температуре в течение 4,5 часов перед процессом в четвертом и пятом циклах. Продолжительность нагрева в печи составляла 17 часов в каждом термическом цикле.

### 4. Результаты исследований

Результаты, полученные при испытаниях на пористость нагретых и ненагретых образцов, приведены в табл. 2. Табл. 3 включает время охлаждения до остановки укорачивания в зависимости от данных термической деформации, полученных при измерениях с помощью индикатора часового типа. Кроме того, уровни термической деформации при различных тепловых циклах показаны на рис. 5. Из-за невозможности измерения длины нагретого образца уровни деформации, приведенные в табл. 3 и на рис. 5, представляют собой отношение деформаций во время охлаждения к длине образцов, измеренных при комнатной температуре. Следовательно, его можно оценить как обратное измерение приблизительной деформации теплового расширения с начальной длиной при комнатной температуре. Данные о потере прочности приведены в табл. 4, включая результаты испытаний UCS для образцов до и после термических циклов. На образцах песчаника были видны трещины, а один из них, охлажденный на воздухе, имел видимый распад. Более того, два образца песчаника, охлажденные в воде, не могли быть использованы в испытании UCS из-за серьезной дезинтеграции (рис. 6). Образцы песчаника с проблемой дезинтеграции не были предпочтительны для использования в испытании UCS из-за изменения поперечного сечения. Образцы известняка, охлажденные в воде, также имели видимые и незначительные трещины в конце термических циклов. Параллельно с наблюдениями самая большая потеря прочности была обнаружена в образцах песчаника, за которыми следовали образцы известняка. Влияние термических циклов на потери прочности графически представлено на рис. 7.

Таблица 2 / Table 2

## Результаты испытаний на пористость

## Results of porosity tests

Тип образца	Перед тепловым циклом			После теплового цикла (воздух)			После теплового цикла (вода)		
	П	СД	№	П	СД	№	П	СД	№
Известняк	0,032	0,007	1	0,045	0,006	1	0,059	0,009	1
Кальцит	0,028	0,005	2	0,033	0,004	2	0,041	0,005	2
Карбонат	0,034	0,009	3	0,039	0,007	3	0,046	0,006	3
Песчаник	0,063	0,011	4	0,094	0,012	4	0,120	0,014	4
Доломит	0,039	0,004	5	0,046	0,005	5	0,058	0,007	5

П – пористость; СД – стандартное отклонение; № – номер образца; воздух – охлаждение на воздухе, вода – охлаждение в воде.

П – porosity; СД – standard deviation; № – sample number; воздух – air cooling; вода – water cooling.

Таблица 3/ Table 3

## Результаты измерений деформации

## Results of strain measurements

Тип образца	Цикл 1		Цикл 2		Цикл 3		Цикл 4		Цикл 5	
	$\varepsilon, (10^{-4})$	t, мин	$\varepsilon, (10^{-4})$	t, мин	$\varepsilon, (10^{-4})$	t, мин	$\varepsilon, (10^{-4})$	t, мин	$\varepsilon, (10^{-4})$	t, мин
Известняк	0,73	21	1,02	29	1,39	35	1,68	42	1,58	39
Кальцит	0,62	20	0,81	32	1,09	45	1,20	54	1,22	55
Карбонат	1,10	16	1,41	22	1,78	27	1,99	33	1,93	32
Песчаник	0,28	15	0,45	20	0,67	24	0,65	28	0,59	24
Доломит	0,13	30	0,18	39	0,24	50	0,29	56	0,30	56

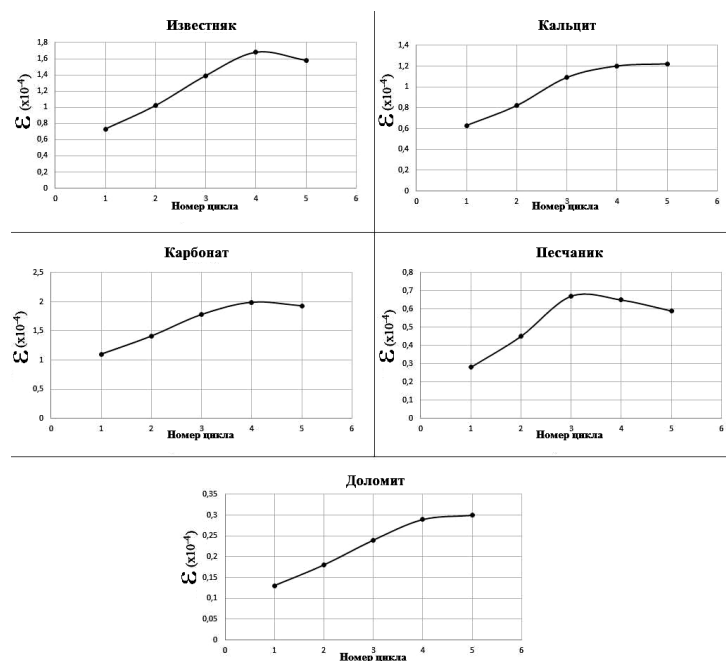


Рис. 5 – Деформация охлаждения при различных тепловых циклах (охлаждение на воздухе)

Fig. 5 – Cooling deformation at different thermal cycles (air cooling)

Таблица 4/Table 4

## Результаты испытаний на прочность на одноосное сжатие (UCS)

## Results of uniaxial compression strength (UCS) tests

Тип образца	Перед тепловым циклом			После теплового цикла (воздух)			После теплового цикла (вода)		
	UCS (МПа)	СД	№	UCS (МПа)	СД	№	UCS (МПа)	СД	№
Известняк	32,7	1,4	1	28,2	1,9	1	25,4	1,5	1
Кальцит	64,0	3,8	2	62,1	3,5	2	60,3	2,7	2
Карбонат	79,8	3,7	3	75,0	4,0	3	70,5	3,9	3
Песчаник	45,5	3,2	4	35,9	3,8	4	25,6	4,0	4
Доломит	82,4	2,9	5	80,7	3,3	5	78,2	3,5	5

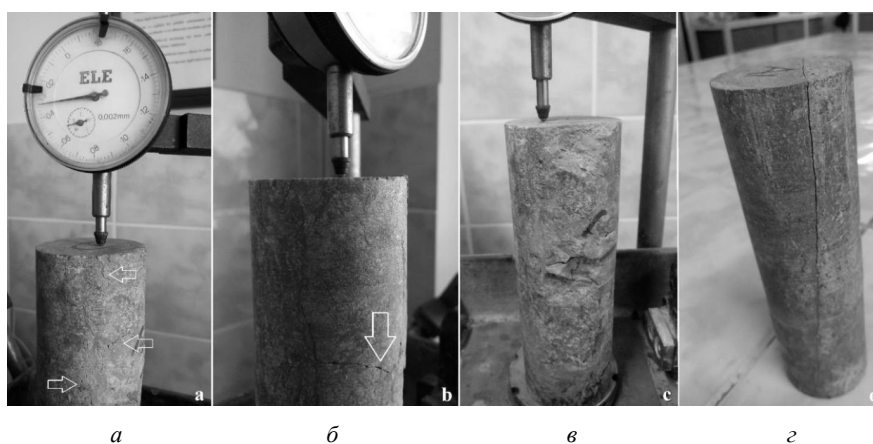


Рис. 6 – Некоторые формы трещин, наблюдаемые в ходе этого исследования:

*a* – узкие трещины; *b* – большие трещины; *в* – разрушение; *г* – распад длинной трещиной по всему образцу

Fig. 6 – Some of the fracture shapes observed during this study are:

*a* – narrow cracks; *b* – large cracks; *c* – fracture; *d* – long crack disintegration throughout the sample

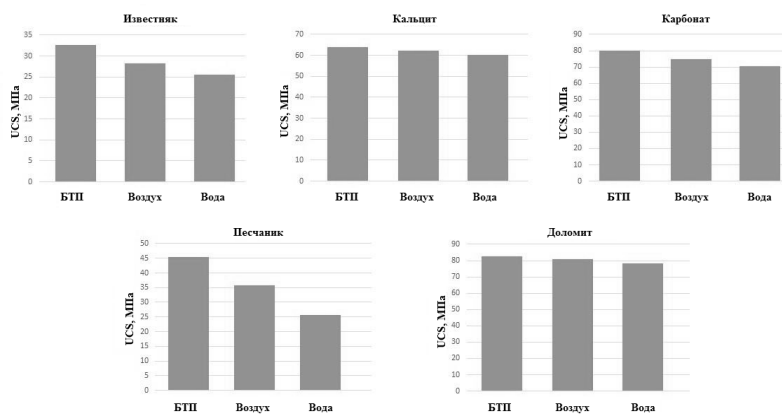


Рис. 7 – Изменение значений прочности на одноосное сжатие при различных условиях охлаждения (БТП: без термического процесса; воздух: охлаждение на воздухе; вода: охлаждение в воде)

Fig. 7 – Change in uniaxial compressive strength values under different cooling conditions (BTP: no thermal process; air: air cooling; water: water cooling)

### Заключение

Как подтверждают результаты исследований, значения деформации охлаждения уменьшаются с увеличением числа тепловых циклов при одном и том же изменении температуры. Было подтверждено, что способность к термической деформации уменьшается с заметным увеличением пористости в результате микротрещин. Пределы термической деформации у образцов песчаника могут уменьшаться, несмотря на повышение температуры продолжающегося термического цикла.

Некоторые образцы известняка после пятого цикла имели узкие видимые трещины. Теплоемкость охлаждающей среды изменяет количество передаваемой энергии в процессе охлаждения образца. Например, образцы имеют более быструю потерю энергии и более быстрое охлаждение при изменении температуры на единицу в воде, а не в воздухе. Таким образом, образцы, охлажденные в воде, имели меньшее сопротивление изменению температуры по сравнению с образцами, охлаждаемыми на воздухе.

В качестве одного из важных результатов этого исследования было обнаружено, что охлаждающая деформация при увеличении числа тепловых циклов снижается после критического цикла. Эту ситуацию автор предлагает назвать потерей деформационной способности охлаждения. Определение потери способности к деформации охлаждения заключается в уменьшении деформации охлаждения по сравнению с таковой в предыдущем термическом цикле при таком же или увеличивающемся изменении температуры. Обычно ожидается, что тепловая деформация будет увеличиваться с увеличением изменения температуры в текущих тепловых циклах. Однако для горных материалов она уменьшается в случае потери деформационной способности охлаждения. Можно сказать, что эта ситуация является результатом ослабления из-за термической усталости.

Циклы нагрева и охлаждения привели к заметным потерям прочности и изменению физических свойств в зависимости от типа породы и охлаждающей среды. В частности, охлаждение в воде привело к значительным потерям прочности для всех образцов, а не на воздухе. Было обнаружено, что породы с высокими значениями потери прочности также имеют высокие потери холодопроизводительности по сравнению с породами с меньшими значениями потери прочности. Таким образом, потеря деформационной способности охлаждения была оценена как индикатор потери прочности. Результаты этого экспериментального исследования призваны внести вклад в новые исследования по разработке нового метода оценки влияния теплового изменения на свойство потери прочности материалов горных пород.

### ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ 26450.1–85. Породы горные. Метод определения коэффициента открытой пористости жидкостенасыщением / Государственный комитет СССР по стандартам. – М.: Изд-во стандартов, 1985.
2. Крюков Г.М. Физика разрушения горных пород при бурении и взрывании. – М.: Горная книга, 2006. – 329 с.
3. Ржевский В.В. Основы физики горных пород. – М.: Недра, 1978. – 390 с.
4. Габриэлянц Г.А. Геология нефтяных и газовых месторождений. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1984. – 285 с.
5. Справочник по геологии нефти и газа / под ред. Н.А. Еременко. – М.: Недра, 1984. – 480 с.
6. Кузнецов В.Г. Литология. Осадочные горные породы и их изучение. – М.: Недра-Бизнесцентр, 2007. – 511 с.



## INFLUENCE OF HEAT SHOCK ON THE STRENGTH PROPERTIES OF ROCKS: AN EXPERIMENTAL STUDY OF THERMAL FATIGUE STRENGTH

**Lipatov N.V.**

*Tyumen State University, Tyumen, Russia  
LLC "Koretest service", Tyumen, Russia*

In the study, various rocks were heated to raise the values up to a temperature of 250 ° C, to determine the values of loss of strength and changes in physical properties, during thermal cycles. As a result of thermal stresses, micro-cracks or visible macro-cracks appear, which lead to noticeable loss of strength depending on various factors such as temperature, heating duration, cooling details and some rock properties such as mineralogical composition, grain size, porosity, microcracks before heating, process [2, 5]. The reason for the loss of strength during heating and cooling, variations in the deformation of various minerals cause cracking in the contacts of the minerals and the propagation of existing cracks.

This situation causes the physical weathering of rock materials. In addition, chemical weathering at high temperatures should be noted as one of the main causes of loss of strength due to thermal changes. In physical weathering, the mineralogical composition of rocks and the temperature level are the determining parameters for chemical weathering. Since temperatures in this study are generally not critical for the onset of chemical weathering, the study focused on physical weathering rather than chemical weathering.

*Keywords:* heat shock, strength properties, rocks, thermal strength, fatigue strength.

DOI: 10.17212/1727-2769-2020-4-32-40

### REFERENCES

1. GOST 26450.1-85 Mountain rocks. Method for determining the coefficient of open porosity by liquid saturation // State Committee of the USSR for Standards, Moscow, 1985.
2. Kryukov G.M. Physics of destruction of rocks during drilling and blasting // Publishing house of the Moscow State Mining University, Gornaya Kniga, Moscow, 2006.
3. Rzhnevsky V.V. Fundamentals of Rock Physics // Nedra, Moscow, 1978.
4. Gabrielyants G.A. Geology of oil and gas fields. – Moscow : Nedra, 1984.
5. Eremenko N.A. Handbook of oil and gas geology // Nedra, Moscow, 1984.
6. Kuznetsov V.G. Lithology. Sedimentary rocks and their study // Nedra-Business Center, Moscow, 2007.

### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



**Липатов Никита Владимирович** – родился в 1993 г. Аспирант 4 курса Тюменского государственного университета, инженер лаборатории механических исследований ООО «Корэстест Сервис». Область научных интересов: теплофизика и теоретическая теплотехника. (Адрес: 625003, Россия, г. Тюмень, ул. Ленина 2а, оф. 002. E-mail: Lipatov.n.v@mail.ru).

**Lipatov Nikita Vladimirovich** (b. 1993) – 4<sup>th</sup> year post-graduate student of Tyumen State University, Engineer of the Mechanical Research Laboratory, Koretest Service LLC. His research interests are currently focused on thermal physics and theoretical heat engineering. (Address: office 002, 2a Lenin St., Tyumen, 625003, Russia. E-mail: Lipatov.n.v@mail.ru).

*Статья поступила 17 ноября 2020 г.  
Received November 17, 2020*

### To Reference:

Lipatov N.V. Vliyanie teplovogo udara na prochnostnye svoistva gornykh porod: eksperimental'noe issledovanie termicheskoi ustalostnoi prochnosti [Influence of heat shock on the strength properties of rocks: an experimental study of thermal fatigue strength]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii = Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2020, no. 4 (49), pp. 32–40. DOI: 10.17212/1727-2769-2020-4-32-40.