

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДРОБИМОСТИ ИЗВЕСТНЯКОВ РАЗЛИЧНОЙ ПОРИСТОСТИ И ВЛАЖНОСТИ ПОД ВЛИЯНИЕМ ЗНАКОПЕРЕМЕННОГО ТЕМПЕРАТУРНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

Захаров Е.В.

*Институт горного дела Севера им. Н.В. Черского Сибирского отделения
Российской академии наук, Якутск*

Ключевые слова: энергоемкость дробления, известняк, циклы замораживания-оттаивания, знакопеременные температурные воздействия, влажность, засоленность, пористость, криолитозона.

Аннотация. Выполненными экспериментальными работами установлено, что напряжения, возникающие при циклическом замораживании-оттаивании исследованных пород, могут приводить к существенному снижению показателей их дробимости. Энергоемкость дробления карбонатных пород, представленных доломитизированным известняком карьера "Удачный" и известняком карьера "Мохсоголлох", после первых трех-пяти циклов замораживания-оттаивания в водной и солевой среде снижается в 2 раза. Степень снижения удельной энергоемкости дробления исследованных образцов зависит от среды, в которой происходит насыщение и замораживание образцов, температурного градиента, вещественного состава горной породы, пористости и т.д. Закономерности изменения показателей дробимости под действием циклического замораживания-оттаивания установленные для исследованных пород могут быть характерны и для других типов горных пород, и в связи с этим, должны учитываться при расчетах устойчивости открытых и подземных горных выработок, а также могут быть использованы для разработки энергоэффективных технологий добычи и переработки минерального сырья.

EXPERIMENTAL STUDIES OF CRUSHABILITY OF LIMESTONES OF DIFFERENT POROSITY AND HUMIDITY UNDER THE INFLUENCE OF ALTERNATING TEMPERATURE EFFECTS

Zakharov E.V.

*Chersky Mining Institute of the North of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
Yakutsk*

Keywords: energy intensity of crushing, limestone, freeze-thaw cycles, alternating temperature effects, humidity, salinity, porosity, permafrost.

Abstract. The experimental work has established that stresses arising during cyclic freezing-thawing of the studied rocks can lead to a significant decrease in their crushability. The energy intensity of crushing carbonate rocks, represented by dolomitized limestone from the Udachny quarry and limestone from the Mokhsogolloh quarry, after the first three to five freeze-thaw cycles in a water and salt environment is reduced by 2 times. The degree of reduction in the specific energy intensity of crushing the studied samples depends on the environment in which the samples are saturated and frozen, the temperature gradient, the material composition of the rock, porosity, etc. The patterns of changes in crushability indicators under the influence of cyclic freezing-thawing established for the studied rocks may be characteristic of other rocks, and in this regard should be taken into account in stability calculations for open-pit and underground mine workings, and can also be used for the development of energy-efficient technologies and processing mineral raw materials.

Введение

В ИГДС СО РАН разработана методика определения удельной энергоемкости дробления горных пород, позволяющая оценить затраты энергии на дробление материала после воздействия циклов замораживания-оттаивания, в том числе проводить испытания полуразрушенных образцов [1].

Удельная энергоемкость дробления горных пород определяется при помощи вертикального копра и основана на определении выхода мелких фракций после дробления исследуемого материала многократными ударами падающего груза. Способ относится к объемному разрушению материала [2]. Особенностью применяемого метода является то, что

исследуются образцы произвольной формы, т.е. нет необходимости в изготовлении образцов правильной геометрической формы [3].

Необходимо также отметить, что с применением данной методики испытываются не единичные образцы горных пород, а целые навески образцов. Проведенные экспериментальные исследования показали, что на образцах в исходном состоянии при нормальных условиях испытаний относительная погрешность определения удельных энергозатрат при надежности 0,95 составляет от 2 до 4% [4].

Материалы и методы исследований

Оценка влияния циклического замораживания-оттаивания на величину удельной энергоемкости процесса дробления горных пород производилась экспериментальным путем на образцах известняка карьера "Мохсоголлох" и доломитизированного известняка трубы "Удачная" по разработанной ранее методике [1].

Изготовление образцов производили следующим образом: исходную породу каждого месторождения вручную дробили до крупности частиц 10-20 мм и отмывали от различных включений. Далее материал высушивали, усредняли и методом квартования отбирали навески для проведения испытаний. Навески подготовленных образцов разделяли на три части: первую часть испытывали в воздушно-сухом состоянии; вторую часть образцов испытывали в водонасыщенном состоянии; третью часть испытывали в соленасыщенном состоянии (5% хлорида натрия). Две последние части образцов выстаивали в соответствующих растворах 48 часов для их полного насыщения [5], а затем совместно с воздушно-сухими образцами замораживали в морозильной камере при температуре -20°C . Достижение температуры контролировали датчиком, расположенным совместно с образцами. Процесс замораживания останавливали по достижению заданной температуры (около 6-8 часов). Навески образцов извлекали из морозильной камеры и при комнатной температуре размораживали. Таким образом осуществляли один цикл замораживания-оттаивания. По программе испытаний дробление образцов осуществляли после 3, 5 и 10 циклов замораживания-оттаивания.

Исследуемые образцы, подвергшиеся определенному количеству циклов, извлекали из водной среды и раствора соли и высушивали при положительной температуре в течение суток. Далее образцы дробили по разработанной методике при помощи вертикального копра [6], где определяли энергоемкость их дробления [7-9]. Дробление исследуемых пород осуществляли на жестком и массивном основании при положительной температуре.

Результаты

В результате проведенных экспериментов установлено, что энергоемкость разрушения водо- и соленасыщенных образцов исследованных карбонатных пород после воздействия пяти циклов замораживания-оттаивания снижается на 12-55% (рис. 1, 2). Степень изменения удельной энергоемкости дробления образцов зависит от среды, в которой происходит насыщение и замораживание образцов, температурного градиента, вещественного состава горной породы, пористости [10], а также масштабного фактора [11].

На рисунке 1 приведены удельные энергозатраты полученные при дроблении известняка с «Мохсоголлохского» карьера. Пористость известняка 1%, влажность воздушно-сухих образцов 0,3%. Хорошо видно, что под влиянием первых трех циклов замораживания-оттаивания удельная энергоемкость дробления водо- и соленасыщенных образцов известняка значительно снижается. Максимальное снижение удельных энергозатрат наблюдается при дроблении известняка насыщенного в солевом растворе, энергозатраты на его разрушение снижаются более чем в 2 раза. На 20% снижается энергоемкость дробления известняка насыщенного в дистиллированной воде, по сравнению с начальным состоянием.

При увеличении количества циклов до пяти, энергоемкость дробления сухих и водонасыщенных образцов известняка продолжает понижаться, в отличие от соленасыщенных образцов. Таким образом, под влиянием 5 циклов замораживания-оттаивания энергоемкость дробления известняка замораживаемого в водной среде снижается

на 40%, а у воздушно-сухих образцов снижается на 9% по сравнению с первоначальными затратами энергии. Дальнейшее увеличение количества циклов до десяти не приводит к существенному изменению удельной энергоёмкости дробления образцов, а энергозатраты на их разрушение продолжают монотонно снижаться.

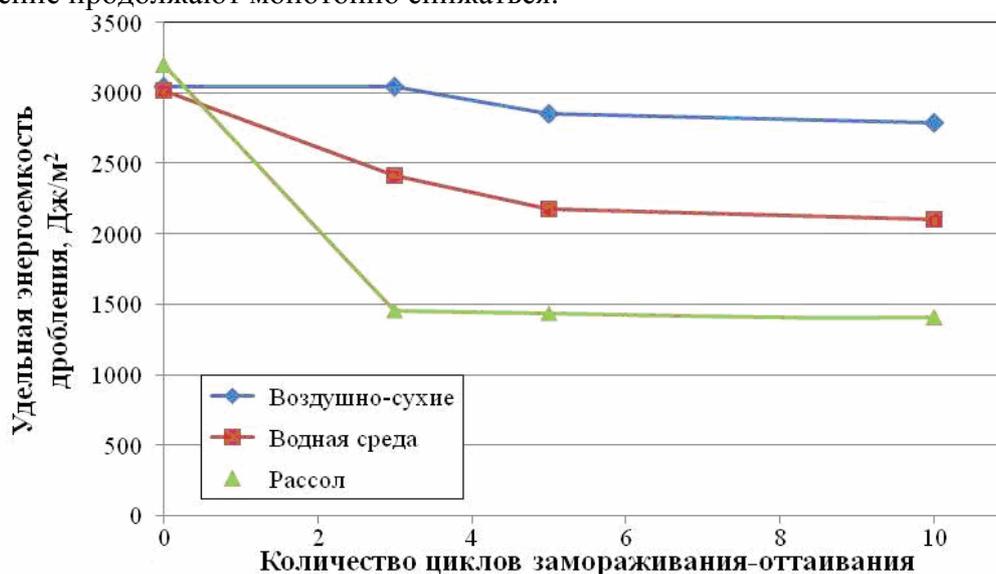


Рис. 1. Удельная энергоёмкость дробления известняка карьера "Мохсоголлох"

На рисунке 2 приведены значения удельных энергозатрат на разрушение доломитизированного известняка отобранного с бортов карьера «Удачный». Пористость данных образцов составляла 6%, влажность воздушно-сухих образцов 0,5%. Образцы исследовались в воздушно-сухом состоянии, в водной среде и 5% растворе $NaCl$. Отчетливо видно, что насыщение их в течение 2 суток в водной среде и 5% растворе соли приводит к снижению удельных энергозатрат на 10% по сравнению с воздушно-сухими образцами. Воздействие 3 циклов замораживания-оттаивания так же приводит к снижению энергозатрат вне зависимости от первоначальной обработки материала. Максимальное снижение удельных энергозатрат – 32% наблюдается у образцов, замораживаемых в водной среде.

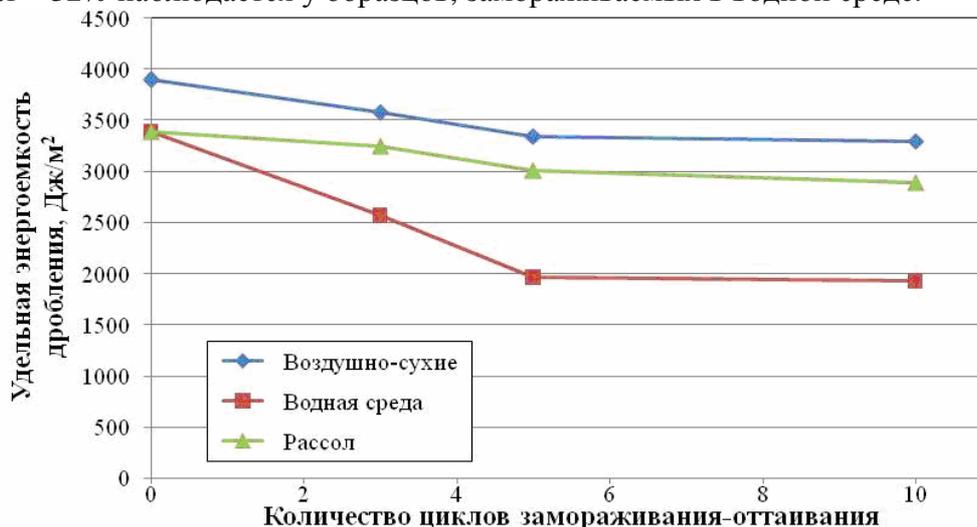


Рис. 2. Удельная энергоёмкость дробления доломитизированного известняка тр. "Удачная"

После воздействия 5 циклов замораживания-оттаивания в водной среде, относительные энергозатраты снижаются на 50% по сравнению с первоначальным значением. Образцы, исследованные в воздушно-сухом состоянии и 5% солевом рассоле, оказались менее подвержены воздействию циклического замораживания-оттаивания. Под воздействием 5 циклов удельная энергоёмкость соленасыщенных образцов снизилась на 10%, а воздушно-сухих на 15% по сравнению со своими исходными значениями.

После 10 циклов замораживания-оттаивания удельная энергоемкость дробления воздушно-сухих и водонасыщенных образцов доломитизированного известняка не изменяется. Необходимо отметить, что циклическое замораживание-оттаивание оказывает на воздушно-сухие образцы доломитизированного известняка более сильное влияние, чем на образцы известняка обладающего пористостью 1% (рис. 1). Как видно из графиков, прослеживается определенная зависимость значений удельных энергозатрат от пористости исследуемого материала.

Выводы

Проведенными экспериментальными исследованиями установлено, что энергоемкость дробления водо- и соленасыщенных образцов исследованных пород под воздействием пяти циклов замораживания-оттаивания снижается на 12-55%.

Понижение энергозатрат под влиянием циклов в процессе дробления исследованных горных пород объясняется, в основном, расклинивающим действием порового льда, а также развитием и накоплением различных дефектов структуры в поровом пространстве испытуемых образцов [12-14]. Важным моментом в разупрочнении горных пород при циклическом знакопеременном воздействии является не только присутствие влаги в породе, но и ее содержание в ней [15].

Заключение

Результаты проведенных экспериментальных исследований могут быть использованы для разработки рекомендаций по повышению устойчивости подземных горных выработок шахт и рудников криолитозоны, в особенности их устьевых частей, вмещающие породы которых даже в течение суток могут подвергаться неоднократному циклическому замораживанию-оттаиванию. Также на основе полученных данных возможна разработка энергосберегающих технологий добычи и переработки исследованного типа сырья.

Благодарности. Автор благодарит старшего лаборанта лаборатории горной теплофизики ИГДС СО РАН Свинобоева А.К. за помощь в проведении значительного объема экспериментальных работ.

Финансирование. Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № 0297-2021-0021, ЕГИСУ НИОКТР № 122011800083-0) с использованием (прибора, приборной базы, инфраструктуры и др.) ЦКП ФИЦ ЯНЦ СО РАН в рамках реализации мероприятий по гранту № 13.ЦКП.21.0016".

Список литературы

1. Захаров Е.В. Влияние знакопеременных температурных воздействий на энергоемкость процесса дробления горных пород: Дисс. ... канд. техн. наук. – Якутск: Институт горного дела Севера им. Н.В. Черского СО РАН, 2012. – 120 с.
2. Барон Л.И., Коняшин Ю.Г., Курбатов В.М. Дробимость горных пород. – М.: Академия Наук СССР, 1963. – 168 с.
3. Кузнецов Н.Н., Пак А.К. О влиянии отношения размеров образцов скальных горных пород на результаты определения их прочности при одноосном сжатии // Вестник МГТУ. – 2014. – Т. 17, № 2. – С. 246-253.
4. Степнов М.Н. Вероятностные методы оценки характеристик механических свойств материалов и несущей способности элементов конструкций. – Новосибирск: Наука, 2005. – 342 с.
5. Кикаева О.Ш. Контроль качества при изготовлении строительных материалов. – М.: Стройиздат, 1987. – 111 с.
6. ГОСТ 21153.1-75. Породы горные. Метод определения коэффициента крепости по Протодьяконову // Введ. 01.07.1976. – Государственный стандарт Союза ССР, 1975. – 3 с.
7. Каркашадзе Г.Г. Механическое разрушение горных пород. – М.: Изд-во МГГУ, 2004. – 224 с.
8. Захаров Е.В., Курилко А.С. Энергоемкость разрушения скальных пород алмазных месторождений Якутии после циклов замораживания-оттаивания // Обогащение руд. – 2018. – №5 (377). – С. 11-16.
9. Гончаров С.А. Физико-технические основы ресурсосбережения при разрушении горных пород. – М.: Изд-во Московского государственного университета, 2007. – 211 с.

10. Peng Ningbo, Hong Jie, Zhu Ye, Dong Yun, Sun Bo, Huang Jizhong. Experimental Investigation of the Influence of Freeze–Thaw Mode on Damage Characteristics of Sandstone // Applied Sciences. 2022, vol. 12(23), p. 12395. DOI: 10.3390/app122312395.
11. Komurlu Eren. Loading rate conditions and specimen size effect on strength and deformability of rock materials under uniaxial compression // International Journal of Geo-Engineering. 2018, vol. 9, pp. 1-11. DOI 10.1186/s40703-018-0085-z.
12. Ржевский В.В. Основы физики горных пород: учебник для вузов. – М.: Недра, 1984. – 359 с.
13. Курилко А.С. Экспериментальные исследования влияния циклов замораживания-оттаивания на физико-механические свойства горных пород. – Якутск: ЯФ ГУ «Изд-во СО РАН», 2004. – 156 с.
14. Вайсберг Л.А., Каменева Е.Е. Изменение структуры горных пород при циклическом замораживании и оттаивании // Обогащение руд. – 2015. – № 2. – С. 28-31.
15. Mellor M. Phase composition of pore water in cold rocks // US Army Corps of Engineers, Cold Region Research and Engineering Laboratory Research Rept. 202, 1970. – 61 p.

References

1. Zakharov E.V. Influence of sign-variable temperature influences on the energy intensity of the process of crushing rocks: Diss. ... cand. of tech. sc. – Yakutsk: Institute of Mining of the North n.a. N.V. Chersky of SB RAS, 2012. – 120 p.
2. Baron L.I., Konyashin Yu.G., Kurbatov V.M. Crushability of rocks. – М.: Academy of Sciences of the USSR, 1963. – 168 p.
3. Kuznetsov N.N., Pak A.K. On the influence of the ratio of the sizes of rock samples on the results of determining their strength under uniaxial compression // Bulletin of MSTU. 2014, vol. 17, no. 2, pp. 246-253.
4. Stepnov M.N. Probabilistic methods for assessing the characteristics of the mechanical properties of materials and the bearing capacity of structural elements. – Novosibirsk: Science, 2005. – 342 p.
5. Kikaeva O.Sh. Quality control in the production of building materials. – М.: Stroyizdat, 1987. – 111 p.
6. GOST 21153.1-75. Mountain rocks. Method for determining the strength coefficient according to Protodyakonov // Introduction. 07/01/1976. – State standard of the USSR, 1975. – 3 p.
7. Karkashadze G.G. Mechanical destruction of rocks. – М.: MSMU Publ. house, 2004. – 224 p.
8. Zakharov E.V., Kurilko A.S. Energy intensity of destruction of rocks of diamond deposits of Yakutia after freezing-thawing cycles // Obogashenie rud. 2018, no. 5 (377), pp. 11-16.
9. Goncharov S.A. Physico-technical foundations of resource conservation during the destruction of rocks. – М.: Moscow State University Publ. house, 2007. – 211 p.
10. Peng Ningbo, Hong Jie, Zhu Ye, Dong Yun, Sun Bo, Huang Jizhong. Experimental Investigation of the Influence of Freeze–Thaw Mode on Damage Characteristics of Sandstone // Applied Sciences. 2022, vol. 12(23), p. 12395. DOI: 10.3390/app122312395.
11. Komurlu Eren. Loading rate conditions and specimen size effect on strength and deformability of rock materials under uniaxial compression // International Journal of Geo-Engineering. 2018, vol. 9, pp. 1-11. DOI 10.1186/s40703-018-0085-z.
12. Rzhhevsky V.V. Fundamentals of rock physics: a textbook for universities. – М.: Nedra, 1984. – 359 p.
13. Kurilko A.S. Experimental studies of the influence of freezing-thawing cycles on the physical and mechanical properties of rocks. – Якутск: ЯФ СУ “Publ. house of SB RAS”, 2004. – 156 p.
14. Weisberg L.A., Kameneva E.E. Changes in the structure of rocks during cyclic freezing and thawing // Obogashenie rud. 2015, no. 2, pp. 28-31.
15. Mellor M. Phase composition of pore water in cold rocks // US Army Corps of Engineers, Cold Region Research and Engineering Laboratory Research Rept. 202, 1970. – 61 p.

Сведения об авторах:

Information about authors:

Захаров Евгений Васильевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник zaharoff@igds.ysn.ru	Zakharov Evgeniy Vasilievich – candidate of technical sciences, senior researcher
--	--

Получена 29.11.2023