

## Экспериментальные исследования удельной энергоемкости разрушения карбонатных пород под действием циклов замораживания–оттаивания

Е.В. Захаров

*Институт горного дела Севера им. Н.В. Черского СО РАН, 677980, Якутск, пр. Ленина, 43, Россия  
e-mail: zaharoff@igds.ysn.ru*

**Аннотация.** Показано влияние циклического замораживания–оттаивания на удельную энергоемкость разрушения карбонатных скальных пород с алмазных месторождений Якутии. Разработана методика определения удельной энергоемкости разрушения горных пород, позволяющая оценить относительное изменение удельной энергоемкости разрушения горных пород при знакопеременных температурных воздействиях. При помощи разработанной методики установлено, что под воздействием первых 3–5 циклов замораживания–оттаивания в водной среде удельная энергоемкость разрушения скальных горных пород различных месторождений Якутии снижается в 2–3 раза. Также под влиянием первых трех циклов замораживания–оттаивания в водной среде более 70 % исходной массы кимберлитов трубок «Интернациональная», «Мир» и более 30 % первоначальной массы известняков трубок «Удачная», «Айхал» дезинтегрируются без механического воздействия лишь под влиянием циклов.

Ключевые слова: циклы замораживания–оттаивания, энергоемкость разрушения, карбонатные породы, кимберлит, дезинтеграция.

## Experimental Studies of Specific Energy of Destruction of Carbonate Rocks under the Influence of Freeze–Thaw Cycles

E.V. Zakharov

*Chersky Mining Institute of the North SB RAS, 43, Lenina Ave., Yakutsk, 677980, Russia  
e-mail: zaharoff@igds.ysn.ru*

**Abstract.** The effect of cyclic freezing-thawing on the specific energy intensity of the destruction of carbonate rock from the diamond deposits of Yakutia is shown. A method for determining the specific energy intensity of destruction of rocks, allowing to estimate the relative change in the specific energy intensity of rock failure under alternating temperature influences is developed. Using the developed method it is established that under the influence of the first 3–5 cycles of freezing-thawing in an aqueous medium, the specific energy of fracture of the rocks from various Yakutia deposits decreases 2–3 times. It is also established that under the influence of first three cycles of freezing and thawing in water, more than 70 % of the original mass of kimberlite from the pipes «Internationalnaya» and «Mir», and more than 30 % of the original weight of limestone from the pipes «Udachnaya» and «Aikhal» disintegrate without mechanical action only after the cycles.

Key words: freeze-thaw cycles, specific energy intensity of destruction, carbonate rocks, kimberlite, disintegration.

### Введение

В настоящее время энергоемкость разрушения горных пород на практике рассчитывается по энергозатратам механизма, производящего разрушение (мельница, дробилка и т.д.). Соответственно существует большое количество ме-

тодов испытаний, связанных со способами разрушения материала, показатели которых могут существенным образом отличаться. По мнению ряда ученых, энергоемкость разрушения горных пород необходимо оценивать с учетом образуемой поверхности [1] и внешней среды, в которой происходит это разрушение [2], при помощи достаточно простых и универсальных методов разрушения.

---

ЗАХАРОВ Евгений Васильевич – к.т.н., н.с.

Нами проведены испытания процессов разрушения горных пород, основанные на использовании вертикального копра [3]. Данный тип испытаний относится к объемному разрушению материала. Суть методики определения удельной энергоемкости разрушения горных пород с использованием вертикального копра заключается в следующем: навески исследуемых образцов неправильной формы крупностью  $-20...+10$  мм, подвергаются воздействию отрицательных температур или циклов замораживания–оттаивания. После выбранного температурного воздействия материал высушивается и дробится на копре, при этом груз определенной массы сбрасывается с заданной высоты на исследуемые образцы. Количество сбрасываний груза определяется выходом фракции  $-0,5$  мм, которая не должна превышать  $15-20$  % всего объема дробимого материала.

Работа, затрачиваемая на механическое дробление горных пород при сбрасывании груза (Дж), вычисляется по формуле (1). В расчет принимаются также потери (5 %), идущие на трение при сбрасывании груза по стенке направляющей трубы:

$$E = \eta \cdot m \cdot g \cdot H, \quad (1)$$

где  $\eta = 0,95$  – потери на трение;  $m$  – масса груза, кг;  $g$  – ускорение свободного падения,  $m/c^2$ ;  $H$  – высота сбрасывания груза, м.

Дробленный материал рассеивается на ситах и по данным гранулометрического анализа рассчитывается площадь вновь образованной поверхности. Для упрощения расчетов форма частиц принимается шарообразной. Расчет производится по формуле [4]:

$$\Delta S = \frac{6}{\rho_0} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{M_i}{d_i} - 6 \cdot \sqrt[3]{\left(\frac{M_n}{\rho_0}\right)^2}, \quad (2)$$

где  $d_i = 0,5 \cdot (d_i + d_{i+1})$  – средний размер класса массой  $M_i$ , мм;  $\rho_0$  – плотность породы,  $кг/м^3$ ;  $M_n$  – масса исходного образца породы, кг.

Используя значения затраченной на дробление энергии (1) и площади вновь образованной поверхности (2), определяется удельная энергоемкость разрушения (Дж/м<sup>2</sup>) горных пород по формуле:

$$\Theta_{\Pi} = \frac{E}{\Delta S}. \quad (3)$$

Проведенные эксперименты показали:

- на образцах в исходном состоянии (без температурного воздействия) относительная погрешность определения удельных энергозатрат при надежности  $0,95$  составила до  $4$  %;

- высокую «чувствительность» метода к значительным температурным воздействиям.

Преимущества используемой методики заключаются в том, что:

- исследуются образцы произвольной, неправильной формы;

- проводятся испытания как при положительных, так и отрицательных температурах;

- испытываются образцы, подвергшиеся влиянию циклов замораживания–оттаивания (частично дезинтегрированные);

- может применяться с успехом методика испытаний в полевых условиях ввиду простоты конструкции прибора, когда необходимо быстро дать оценку энергозатрат после различного рода воздействий;

- могут проводиться сравнительные испытания с использованием данной методики.

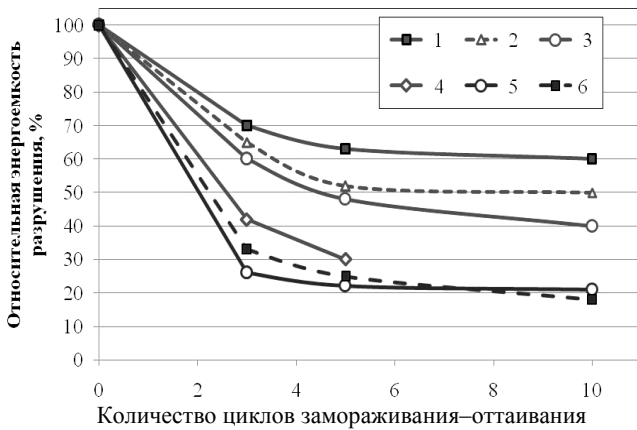
### Методика

Исследования влияния циклов замораживания–оттаивания на энергоемкость процесса разрушения горных пород проводились следующим образом.

Исследуемые образцы скальных пород предварительно дробили для получения материала крупностью  $-20...+10$  мм. Из дробленого материала формировали навески образцов массой по  $50$  г каждая. В дальнейшем навески разделяли на две группы: испытываемые в водной среде и испытываемые в  $5$  %-м растворе хлорида натрия, которые подвергались воздействию заданного числа циклов замораживания–оттаивания. В каждой группе при конкретно заданном количестве циклов замораживания–оттаивания испытывалось от пяти до пятнадцати навесок материала.

Разделенные на группы навески образцов помещались в алюминиевые бьюксы и заливались дистиллированной водой или  $5$  %-м раствором *NaCl*, после чего в течение  $48$  ч выстаивались в соответствующих средах для насыщения пор [5]. По истечении времени насыщения образцы замораживались в морозильной камере при температуре  $-20$  °С. Время замораживания контролировалось термодатчиком, находящимся в одной из замораживаемых бьюкс, и в среднем составляло  $6$  ч. В дальнейшем навески образцов вынимали из морозильной камеры и размораживали при положительной температуре. Так проходил один цикл замораживания–оттаивания. После воздействия заданного количества циклов ( $3, 5, 10$ ) образцы, в том числе частично или полностью дезинтегрированные, высушивали и по разработанной методике определяли удельную энергоемкость разрушения испытываемого материала.

Удельные энергозатраты на разрушение исследуемых пород в исходном состоянии (без



**Рис. 1.** Относительная энергоёмкость разрушения горных пород в зависимости от циклов замораживания–оттаивания (водная среда):

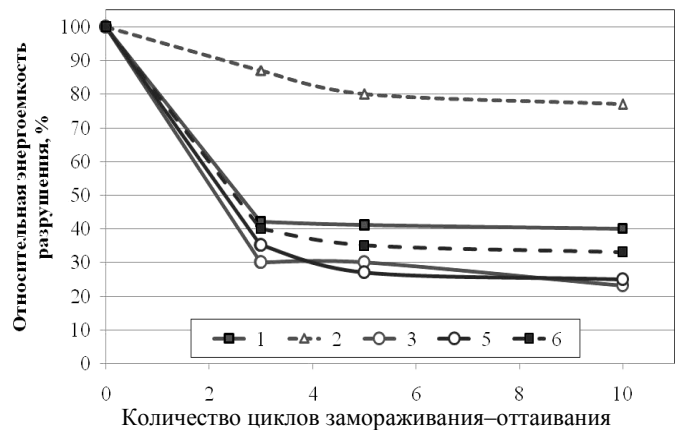
1 – известняк карьер «Мохсоголлох» (пористость 1 %); 2 – доломитизированный известняк трубка «Удачная» (пористость 6 %); 3 – известняк трубка «Удачная» (пористость 12 %); 4 – известняк трубка «Айхал» (пористость 12 %); 5 – кимберлит трубка «Мир» (пористость 10 %); 6 – кимберлит трубка «Интернациональная» (пористость 13 %)

воздействия циклов замораживания–оттаивания) составили: для известняка карьера «Мохсоголлох» – 3500 Дж/м<sup>2</sup>, доломитизированного известняка карьера «Удачный» – 3720 Дж/м<sup>2</sup>, известняка карьера «Удачный» – 4060 Дж/м<sup>2</sup>, известняка карьера «Айхал» – 2820 Дж/м<sup>2</sup>, кимберлитов трубки «Интернациональная» – 2100 Дж/м<sup>2</sup>, трубки «Мир» – 2470 Дж/м<sup>2</sup>.

В результате проведенных экспериментов установлено, что удельная энергоёмкость разрушения карбонатных пород и кимберлита алмазных месторождений Якутии после 3–5 циклов замораживания–оттаивания в водной среде снижается в 2–3 раза (рис. 1). Как и в случае с влиянием отрицательных температур [3, 6], снижение удельной энергоёмкости разрушения при циклическом воздействии знакопеременных температур тем выше, чем выше пористость исследуемого материала.

Хорошо видно, что воздействие первых трех циклов замораживания–оттаивания на карбонатные породы в водной среде (рис. 1) и в 5 %-м солевом растворе (рис. 2) приводит к снижению удельной энергоёмкости их разрушения на 30–70 %. Дальнейшее увеличение числа циклов замораживания–оттаивания до 5 уже не приводит к значительному изменению энергозатрат – максимум наблюдается снижение еще на 10–12 % (рис.1). В дальнейшем энергозатраты остаются на таком же уровне вплоть до 11 цикла.

Образцы кимберлита ввиду своего гетерогенного состава и большей пористости под воздействием циклического замораживания–оттаивания дезинтегрируются и разрушаются сильнее,



**Рис. 2.** Относительная энергоёмкость разрушения горных пород в зависимости от циклов замораживания–оттаивания (5 %-й солевой раствор). Усл.обозначения приведены на рис. 1

чем известняки. Относительная энергоёмкость разрушения водонасыщенных и насыщенных в 5 %-м растворе NaCl образцов кимберлита трубок «Интернациональная» и «Мир» после 3 циклов замораживания–оттаивания на 60–75 % меньше, чем в исходном состоянии.

Необходимо отметить, что под влиянием циклов происходит снижение удельной энергоёмкости разрушения воздушно-сухих образцов [7].

Снижение удельной энергоёмкости разрушения исследованных горных пород в результате воздействия на них циклического замораживания–оттаивания объясняется образованием и накоплением различных дефектов в испытуемых образцах, например, в результате расклинивающего действия льда, находящегося в порах породы, различия в упругих свойствах, коэффициентах теплового расширения отдельных зерен, слагающих породу и т.д.

### Заключение

Проведенными экспериментальными исследованиями установлено, что под воздействием первых 3–5 циклов замораживания–оттаивания в водной среде энергоёмкость разрушения карбонатных горных пород и кимберлита с алмазных месторождений Якутии снижается в 2–3 раза.

Результаты исследований по влиянию знакопеременных температурных воздействий на энергоёмкость процесса разрушения горных пород могут послужить основой для разработки: энергосберегающих технологий добычи и пере-

работки полезных ископаемых в условиях криолитозоны; мероприятий по обеспечению устойчивости горных выработок [8]; кристаллосберегающих технологий добычи и переработки алмазосодержащего сырья [9].

#### Литература

1. Барон Л.И., Коняшин Ю.Г., Курбатов В.М. Дробимость горных пород. М.: АН СССР, 1963. 168 с.
2. Ребиндер П.А. Физико-химическая механика дисперсных структур. М.: Наука, 1966. 163 с.
3. Захаров Е.В. Исследование влияния знакопеременных температурных воздействий на энергоемкость процесса дробления горных пород // ГИАБ. М.: МГГУ, 2009. № 5. С. 276–282.
4. Каркашадзе Г.Г. Механическое разрушение горных пород. М.: МГГУ, 2004. 224 с.
5. Кикаева О.Ш. Контроль качества при изготовлении строительных материалов. М.: Стройиздат, 1987. 111 с.
6. Курилко А.С., Захаров Е.В. Экспериментальные исследования влияния отрицательных температур на энергоемкость разрушения карбонатных пород // ГИАБ. ОВ 10. Современные геотехнологии на горных предприятиях. 2011. С. 154–162.
7. Захаров Е.В., Курилко А.С. Энергетические показатели разрушения горных пород и их зависимость от температурного фактора // Наука и образование. 2009. № 1. С. 19–25.
8. Соловьев Д.Е., Хохолов Ю.А., Захаров Е.В. Изменение контуров незакрепленной горной выработки под действием циклов замораживания–оттаивания // Геомеханические и геотехнологические проблемы эффективного освоения месторождений твердых полезных ископаемых Северных и Северо-Восточных регионов России: Труды Всероссийской научно-практич. конф., посв. памяти чл.-корр. РАН Новопашина М.Д. Якутск: ИМЗ СО РАН, 2011. С. 68–72.
9. Курилко А.С., Захаров Е.В., Попов В.И. Знакопеременные температурные воздействия как фактор энергосбережения для технологий комплексной подготовки рудного сырья в условиях криолитозоны // ГИАБ. М.: МГГУ, 2015. №5. С. 84–92.

*Поступила в редакцию 10.04.2017*