

УДК 622.23.02

**ЛОКАЛЬНЫЙ МИНИМУМ ЭНЕРГОЕМКОСТИ РАЗРУШЕНИЯ
СКАЛЬНЫХ ПОРОД В ДИАПАЗОНЕ ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ТЕМПЕРАТУР**

Е. В. Захаров, А. С. Курилко

*Институт горного дела Севера им. Н. В. Черского СО РАН, E-mail: zaharoff@igs.ysn.ru,
просп. Ленина, 43, 677980, г. Якутск, Россия*

Приведены результаты исследований по определению влияния отрицательных температур на удельную энергоемкость разрушения горных пород. Установлено, что энергоемкость разрушения известняков карьеров “Удачный” и “Мохсоголлох”, а также кимберлита трубок “Интернациональная” и “Удачная” в диапазоне температур от -5 до -15°C существенно снижается.

Энергоемкость разрушения, отрицательные температуры, карбонатные породы, кимберлит

Добыча и переработка полезных ископаемых в условиях Крайнего Севера, в отличие от центральной части России, значительно затруднена вследствие жестких природно-климатических условий и отсутствия развитой инфраструктуры. В некоторых районах более полугодя температура окружающего воздуха остается ниже 0°C , поэтому воздействие отрицательных температур на основные физические свойства горных пород представляет большой научный интерес.

Для всех грунтов с понижением температуры сопротивляемость разрушению и энергоемкость разрушения непрерывно возрастают [1]. В работах [2, 3] это явление, при небольших отрицательных температурах грунта от -3 до -5°C , объясняется уменьшением количества незамерзшей воды в грунте, а при более низких температурах определяющим фактором является все возрастающая прочность кристаллической решетки льда. В [4] показано, что при изменении температуры от -2 до -12°C энергоемкость разрушения глины, суглинка, супеси и песка увеличивается в 2–3 раза.

Энергоемкость разрушения скальных горных пород, в отличие от дисперсных, в области отрицательных температур изучена слабо. Имеющиеся данные говорят о снижении удельных энергозатрат при температурах от -60 до -150°C и ниже. Установлено, что удельная работа разрушения габбро-диабазы и различных песчаников при температурах ниже -150°C в 4–6 раз меньше работы разрушения при положительной температуре [5]. Результаты исследований, полученные в [6], показывают, что охлаждение поверхностного слоя гранита до $-60\dots-80^{\circ}\text{C}$ приводит к уменьшению работы, затрачиваемой на его разрушение, в 2.1 раза [6]. Однако в диапазоне температур, характерных для районов Крайнего Севера, от 0 до -40°C , данные об изменении энергоемкости разрушения скальных горных пород отсутствуют.

В Институте горного дела Севера СО РАН выполнены исследования влияния отрицательных температур на удельную энергоемкость разрушения скальных горных пород. Разработана методика проведения испытаний, основанная на применении вертикального копра [7]. Относительная погрешность испытаний на образцах горных пород в исходном состоянии (без воздействия знакопеременных температур) при надежности 0.95 составляла не более 4%.

Влияние отрицательных температур на удельную энергоемкость разрушения горных пород исследовалось на известняках карьеров “Удачный”, “Мохсоголлох”, а также на кимберлитах трубок “Интернациональная”, “Удачная”. В таблице приведены основные физические свойства исследуемых пород.

Порода	Плотность, кг/м ³	Влажность, %	Пористость, %
Известняк карьера “Удачный”	2710	0.5	12
Известняк карьера “Мохсоголлох”	2755	0.3	1
Кимберлит трубки “Интернациональная”	2780	3.5	13
Кимберлит трубки “Удачная”	2765	1	5

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИСПЫТАНИЙ

Исходные образцы пород предварительно отмывали от глинистых включений и высушивали при положительной температуре (20°C). Высушенные образцы дробили для получения материала класса крупности –20 + 10 мм, затем методом квартования формировали навески для проведения испытаний. Образцы испытывали в воздушно-сухом, водонасыщенном и насыщенном 5 % раствором NaCl состоянии. В водной среде и рассоле образцы выдерживали в течение 2 сут для насыщения пор. После насыщения образцы вынимали из воды и рассола, обтирали и вместе с воздушно-сухими образцами помещали в морозильную камеру с температурой –5, –10, –15, –20°C. Время замораживания образцов составляло 6 ч и контролировалось термодатчиком. После достижения заданной температуры образцы дробили на вертикальном копре многократными ударами падающего груза [8, 9].

Дробленный материал подвергали полному ситовому анализу для определения площади поверхности, образованной в результате дробления. Используя данные по затраченной на дробление энергии и площади образованной поверхности, рассчитывали удельную энергоемкость разрушения материала.

В исходном состоянии при положительной температуре (20°C) удельные энергозатраты на разрушение горных пород составили, Дж/м²: для известняков карьера “Удачный” 4060, известняков карьера “Мохсоголлох” 3500, кимберлита трубки “Интернациональная” 2100, трубки “Удачная” 3200. Для сравнения значений удельных энергозатрат результаты исследований приведены в относительных удельных энергозатратах, при этом за 100 % приняты энергозатраты, полученные при положительной температуре 20°C (рис. 1). Точками показаны данные эксперимента, по которым проведены линии тренда. Установлено, что в диапазоне температур от –5 до –15°C удельная энергоемкость разрушения карбонатных пород карьеров “Удачный”, “Мохсоголлох” и кимберлита трубок “Интернациональная”, “Удачная” на 10–40 % ниже, чем при положительной температуре.

На рис. 1а показаны относительные энергозатраты на разрушение известняка карьера “Удачный” в зависимости от температуры. Понижение температуры от 20 до –5°C приводит к снижению удельных энергозатрат образцов на 25–40 % в зависимости от условий подготовки образцов к испытаниям. При дальнейшем понижении температуры энергозатраты на разрушение увеличиваются, но в среднем остаются на 13 % меньше, чем при 20°C.

Степень влияния температуры на удельную энергоемкость разрушения горных пород зависит также от их пористости. Для известняка карьера “Удачный”, обладающего пористостью 12 %, удельная энергоемкость разрушения при температуре –5°C в среднем на 35 % ниже, чем при положительной температуре. Удельная энергоемкость разрушения известняка карьера “Мохсоголлох” (рис. 1б) с пористостью 1 % имеет минимальное значение при температуре –10°C и в среднем ниже на 12 %, чем при положительной температуре.

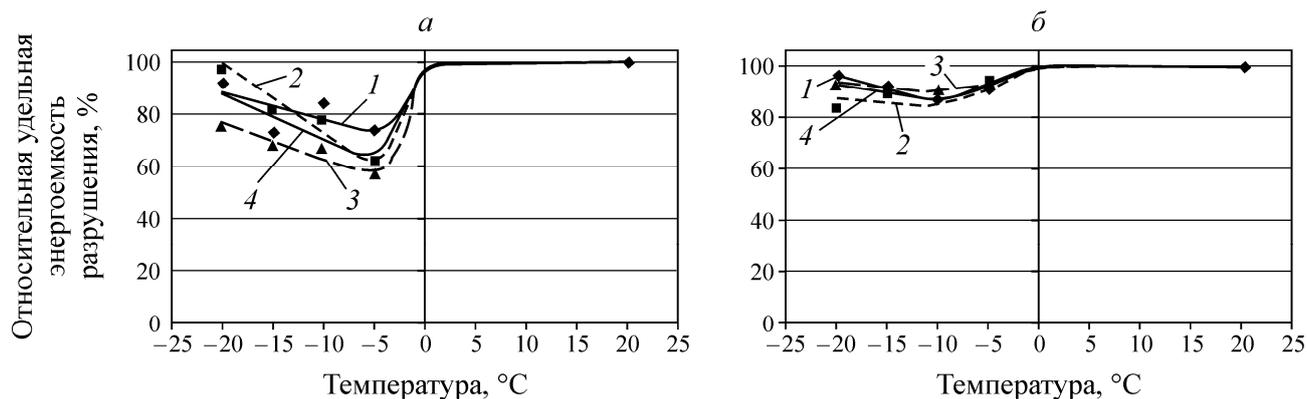


Рис. 1. Относительная удельная энергоёмкость разрушения известняка: *a* — карьер “Удачный”; *б* — карьер “Мохсоглох”; 1 — среднее по результатам замораживания в воздушно-сухом состоянии (◆); 2 — среднее по результатам замораживания в дистиллированной воде (■); 3 — среднее по результатам замораживания в 5% солевом растворе (▲); 4 — общий усредненный показатель (—)

На рис. 2*a* приведены относительные удельные энергозатраты на разрушение кимберлита трубки “Интернациональная”. Как следует из графика, изменение температуры от 20 до -20°C способствует увеличению на 15 % относительных энергозатрат на разрушение воздушно-сухих образцов кимберлита.

При испытаниях образцов, насыщенных в водной среде и солевом растворе, при отрицательных температурах наблюдается значительное снижение затрачиваемой на разрушение энергии. Максимальное снижение энергетических затрат отмечается при температуре -5°C . Удельные энергозатраты при этом на 35–40 % ниже, чем при положительной температуре. При дальнейшем понижении температуры до -20°C энергозатраты увеличиваются, но остаются на 20–25 % меньше, чем при температуре 20°C .

Кимберлит трубки “Удачная” был предоставлен Институтом геологии алмаза и благородных металлов СО РАН, но ввиду ограниченного его количества испытания образцов проводились лишь в воздушно-сухом и водонасыщенном состоянии. На рис. 2*б* приведены значения относительных удельных энергозатрат, полученных в ходе исследования. Понижение температуры от 20 до -5°C вызывает снижение удельной энергоёмкости разрушения водонасыщенных образцов кимберлита на 17%. Дальнейшее понижение температуры до -20°C приводит к тому, что затраты энергии на разрушение образцов становятся равны энергозатратам, полученным при положительной температуре.

При исследовании воздушно-сухих образцов удельная энергоёмкость разрушения непрерывно возрастает, подобное наблюдалось при испытаниях кимберлита трубки “Интернациональная” (рис. 2*a*). При -20°C удельные энергозатраты на 20 % больше, чем при положительной температуре.

Характер изменения удельной энергоёмкости разрушения исследуемых пород хорошо согласуется с установленной ранее зависимостью прочности карбонатных пород от температуры. На рис. 3 показана зависимость прочности вмещающих известняков и кимберлита карьера “Удачный” от температуры в водонасыщенном состоянии [10, 11]. Видно, что с понижением температуры от 20 до -5°C прочность кимберлита снижается на 18 %, при дальнейшем понижении температуры до -10°C прочность снижается на 40 % по сравнению с прочностью при положительной температуре. Прочность карбонатных пород при понижении температуры с 20 до $-5\dots-20^{\circ}\text{C}$ снижается на 50 %, однако при дальнейшем понижении температуры прочность карбонатных пород и кимберлита возрастает.

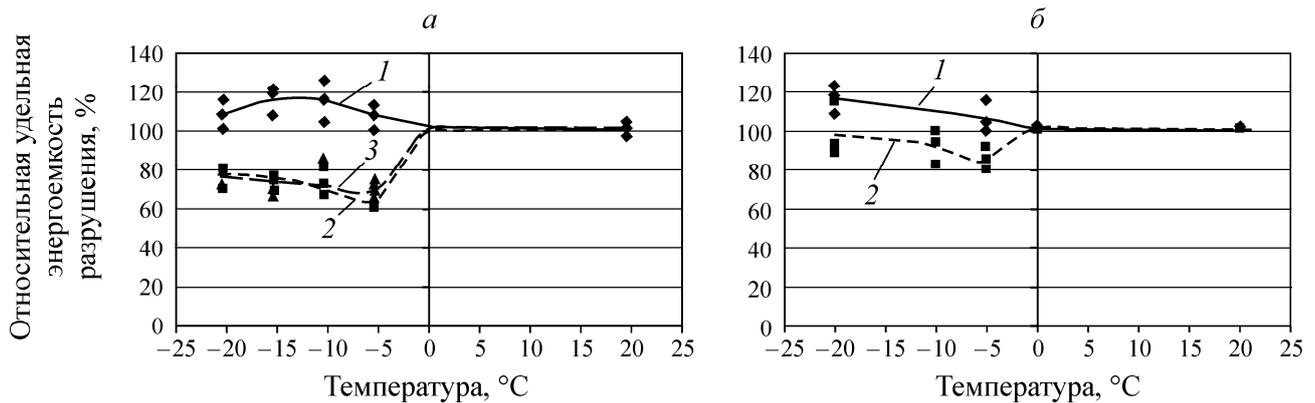


Рис. 2. Относительная удельная энергоёмкость разрушения кимберлита: а — трубы “Интернациональная”; б — трубы “Удачная”; 1 – 3 — см. на рис. 1

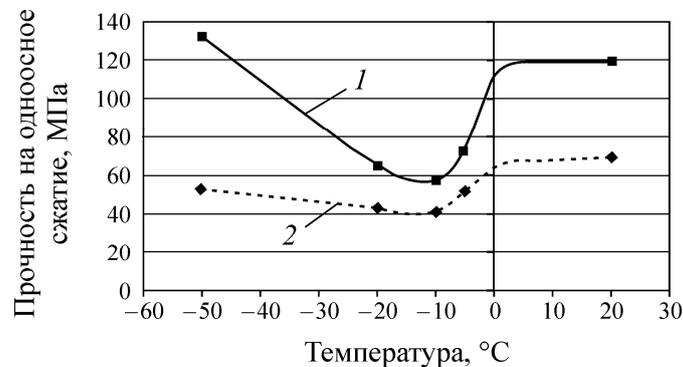


Рис. 3. Зависимость прочности водонасыщенных известняков (1) и кимберлита (2) карьера “Удачный” от температуры

Изменение прочности и удельной энергоёмкости разрушения пород в зависимости от температуры объясняется тем, что при понижении температуры происходят различные физические и термохимические превращения. Возникают внутренние термонапряжения, обусловленные различием в упругих свойствах, коэффициентах теплового расширения зерен, слагающих породу, а также изменением агрегатного состояния одного из компонентов горной породы — воды. При переходе свободной воды в лед происходит увеличение ее объема на 9 %, за счет чего в процессе замерзания поровой влаги в породе возникают расклинивающие напряжения.

С прекращением образования кристаллов льда рост внутренних напряжений прекращается. В породах, насыщенных пресной водой, интенсивное замерзание влаги происходит от 0 до -3°C , а при их насыщении растворами солей диапазон температур интенсивных фазовых переходов смещается в зону более низких температур и может достигать в зависимости от концентрации и состава растворов -20°C и ниже. Как показали эксперименты по определению количества незамерзшей воды во вмещающих породах при отрицательных температурах, интенсивные фазовые переходы прекращались при температуре -10°C .

При дальнейшем понижении температуры поровый лед цементирует и упрочняет породу. С этим связано увеличение удельной энергоёмкости разрушения породы после того, как ее температура становится ниже температур интенсивных фазовых переходов.

ВЫВОДЫ

Впервые экспериментально установлено, что в диапазоне температур $-5 \dots -15^{\circ}\text{C}$ существует локальный минимум, в котором удельная энергоемкость разрушения карбонатных пород карьеров “Удачный”, “Мохсоголлох”, кимберлита трубок “Интернациональная” и “Удачная” на 10–40 % ниже, чем при положительной температуре. Степень снижения энергоемкости разрушения горных пород зависит от их прочности, пористости, влажности и минерализации порового раствора.

Проведенные эксперименты показали, что внутренние напряжения, возникающие в горных породах при фазовом переходе воды в лед, в ряде случаев могут приводить к существенному снижению энергоемкости их разрушения, что в свою очередь может послужить основой для разработки энергосберегающих технологий добычи и переработки полезных ископаемых криолитозоны, а также мероприятий по обеспечению устойчивости горных выработок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Потемкин С. В.** Разупрочнение мерзлых и сцементированных пород россыпных месторождений: практ. и учеб. пособие. — М.: МГГА, 1995.
2. **Цытович Н. А.** Механика грунтов. — М.: Госстройиздат, 1963.
3. **Зеленин А. Н.** Основы разрушения грунтов механическими способами. — М.: Машиностроение, 1968.
4. **Федулов А. И., Иванов Р. А.** Удельные показатели процесса разрушения материалов и оценки технического уровня ударных машин // ФТПРПИ. — 2006. — № 1.
5. **Ржевский В. В., Новик Г. Я.** Основы физики горных пород: учебник для вузов. — М.: Недра, 1984.
6. **Москалев А. Н., Пигида Е. Ю., Керекелица Л. Г., Вахалин Ю. Н.** Разрушение горных пород при термоциклическом воздействии. — Киев: Наук. думка, 1987.
7. **Захаров Е. В., Курилко А. С.** Энергетические показатели разрушения горных пород и их зависимость от температурного фактора // Наука и образование. — 2009. — № 1 (53).
8. **Барон Л. И., Коняшин Ю. Г., Курбатов В. М.** Дробимость горных пород. — М.: Изд-во АН СССР, 1963.
9. **Каркашадзе Г. Г.** Механическое разрушение горных пород. — М.: Изд-во МГГУ, 2004.
10. **Курилко А. С.** Экспериментальные исследования влияния циклов замораживания–оттаивания на физико-механические свойства горных пород. — Якутск: ЯФ ГУ Изд-во СО РАН, 2004.
11. **Курилко А. С., Новопашин М. Д.** Об особенностях влияния низкой температуры на прочность вмещающих пород и кимберлита трубки “Удачная” // ФТПРПИ. — 2005. — № 2.

Поступила в редакцию 25/XI 2013