

УДК 622.73

**Е.В. Захаров**

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЗНАКОПЕРЕМЕННЫХ  
ТЕМПЕРАТУРНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ  
НА ЭНЕРГОЕМКОСТЬ ПРОЦЕССА  
ДРОБЛЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД**

Семинар № 3

**И**звестно, что на операции дробления и измельчения добытых полезных ископаемых в процессе их обогащения приходится более половины энергозатрат и общих эксплуатационных расходов. В связи с этим изыскание малоэнергоемких способов предварительного разупрочнения добытой руды является важной задачей.

В данной работе исследовалось влияние циклов замораживания-оттаивания на энергоемкость процесса дробления вмещающих горных пород карьера «Удачный» ЗАО АК «АПРОСА».

Методика проведения испытаний.

По минералогическим признакам горная порода относится к известнякам, цвет образцов светло-серый. Вид исходного материала представлен на рис. 1. Перед проведением испытаний определялись влажность, плотность и пористость материала по методике [1]. Для определения влажности брали навеску материала в исходном состоянии и взвешивали, затем подвергали сушке до постоянного веса в сушильном шкафу СНОЛ-3,5И1 при температуре  $110 \pm 5$  °С, затем снова взвешивали и так до установления постоянной массы. Влажность исходного материала варьировала от 0,45 до 2,5 %. Для определения плотности материал насыщали дистиллированной водой в течение 2 суток [1], затем после насыщения, по-

мешали в мензурку с водой для определения объема вытесненной жидкости. После нахождения объема весь материал подвергался сушке в шкафу и взвешивался. Плотность материала составила  $2,67 \text{ г/см}^3$ , пористость 7,5 %.

Исходная проба породы была предварительно просеяна по классу +10 мм, затем отмыта от глинистых включений и просушивалась в течение двух суток при комнатной температуре.

После сушки вновь был произведен рассев по классу +10 мм. Далее из усредненной пробы путем квартования были сформированы 40 навесок каждая массой около 50 гр. для двух серий опытов, условия проведения которых приведены в табл. 1.

Группа 1 каждой серии подвергалась дроблению в исходном состоянии, без температурного воздействия и выстаивания. Группы 2-5 выстаивались в течение двух суток в 5 % растворе NaCl (для I серии) и дистиллированной воде (для II серии), после выстаивания данные группы образцов замораживались в морозильной камере «Бирюса» при температуре -20°С. Достижение температуры -20 °С фиксировалось датчиком, помещенным в один из замораживаемых бьюсков. Время замораживания необходимое для достижения заданной температуры составляло 6 часов. Для ускорения

Таблица 1

**Разделение навесок по группам**

I серия (с выстаиванием и замораживанием в солевом растворе)			II серия (с выстаиванием и замораживанием в дистил. воде)		
Гр.	Кол-во циклов замораживания-оттаивания	Прим.	Гр.	Кол-во циклов замораживания-оттаивания	Прим.
1	В исходном состоянии		1	В исходном состоянии	
2	Один	C <sub>NaCl</sub> = 50 г/л t = -20 °С	2	Один	t = -20 °С
3	Три		3	Три	
4	Пять		4	Пять	
5	Десять		5	Десять	

процесса размораживания, бьюсы с образцами помещались в сосуд с водой при комнатной температуре, продолжительность размораживания и разогрева, образцов до температуры +20 °С составило 3 часа.

Уже после первого цикла замораживания-оттаивания в некоторых бьюсах наблюдалась частичная дезинтеграция образцов. Дальнейшее воздействие циклов замораживания-оттаивания значительно увеличивало массу самопроизвольно дезинтегрировавшегося материала, что видно на рис. 2.

После воздействия заданного количества циклов замораживания-оттаивания материал высушивался при комнатной температуре, затем подвергался ситовому анализу для нахождения площади поверхности, образованной в результате воздействия циклов. Результаты ситового анализа приведены на рис. 3. Так как с группой 1 (I и II серии) не производились циклы замораживания-оттаивания, то все 100 % материала содержались в классе -20+10 мм. Предварительный рассев показал, что уже после трех проведенных циклов в солевом растворе и после одного цикла в дистиллированной воде около 30 % исходного материала перешло в меньшие классы крупности без механического воздействия.

Как видно из приведенных гистограмм с увеличением количества цик-

лов замораживания-оттаивания основное накопление материала происходит в классе крупности -5+2 мм. Наличие значительной массы мелкой фракции во второй серии опытов, характеризуется более интенсивным изменением объема компонентов породы при замерзании воды в порах, когда её объем увеличивается примерно на 9 %. Оценки показывают, что при температуре -20 °С давление замерзающей воды в замкнутом пространстве может достигать 220 МПа [2].

Расчет площади поверхности образованной при самопроизвольной дезинтеграции образцов, производили по формуле (1). Для упрощения расчетов форма частиц принималась шарообразной [3]:

$$\Delta S = \frac{6}{\rho_0} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{M_i}{d_i} - 4,84 \cdot \left( \frac{M_n}{\rho_0} \right)^{\frac{2}{3}} \quad (1)$$

где  $d_i'$  - средний размер класса массой  $M_i$ ;  $d_i' = 0,5(d_i + d_{i+1})$ , м;  $\rho_0$  - плотность породы, кг/м<sup>3</sup>;  $M_n$  - масса исходного образца породы, кг.

Для наглядности на рис. 4 приведены результаты расчетов площадей образованных поверхностей групп каждой серии после воздействия циклов замораживания-оттаивания. Значительное отличие расчетных показателей I и II серий (в 2-6 раз), может быть объяснено не только влиянием



**Рис. 1. Исходный материал**

среды, в которой проводилось замораживание, но наличием, а также раскрытием имеющихся в породах первичных дефектов.

В дальнейшем, после нахождения площади образованной поверхности, весь разделенный на фракции материал смешивался и подвергался общему дроблению (серия I), а в серии II было проведено селективное дробление: ДР1 – дробление только оставшегося после воздействия циклов класса -20+10 мм; ДР2 – дробление вновь образованного класса -10+5 мм. Дробление проводилось по методу толчения на видеоизмененном копре Сыскова [4] или приборе для определения крепости (ПОК). Навески каждой серии засыпались в грузочный стакан и измельчались путем троекратного (пятикратного) сбрасывания груза массой 2,6 кг, с постоянной высоты 0,6 м. Принимались в учет также потери на трение 5 %. Энергия, затраченная на дробление определялась по формуле:

$$E = \eta \cdot m \cdot g \cdot H \quad (2)$$

где  $m$  – масса навески, кг;  $H$  – высота сбрасывания, м;  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>.



**Рис. 2. Образцы после 7 циклов замораживания-оттаивания**

Все три (пять) порций измельченного материала ссыпали на одно проволочное сито с отверстиями размером 0,5 мм, после чего их совместно просеивали. Фракцию, прошедшую через сито 0,5 мм, высыпали в трубку объеммера. Уплотнение мелкой фракции в трубке достигали легким постукиванием. После этого в трубку вставляли мерный плунжер и определяли высоту столбика пыли (- 0,5 мм).

По методике устанавливать число ударов гирей следует так, чтобы высота столбика пыли в объеммере находилась в пределах 10-50 мм. Иначе при низком выходе пыли коэффициент крепости получится завышенным и наоборот. Исходя из этих условий для каждой серии 1 и 2 групп, а также для группы 3 (серия I) - число ударов гирей равнялось пяти, а для групп 3 (серия II) 4 и 5 количество ударов равнялось трем. В процессе дробления была определена крепость породы исходя из высоты столбика пыли по следующей формуле [4]:

$$f = \frac{20 \cdot n}{l} \quad (3)$$

где  $n$  - число сбрасываний гири;  $l$  - высота столбика пыли в объеммере, мм.

Таблица 2

**Результаты экспериментов по энергоемкости дробления образцов (в скобках приведены данные по серии II)**

	Группа 1	Группа 2	Группа 3	Группа 4	Группа 5
Количество циклов замораживания-оттаивания	<b>0</b> <b>(0)</b>	<b>1</b> <b>(1)</b>	<b>3</b> <b>(3)</b>	<b>5</b> <b>(5)</b>	<b>10</b> <b>(10)</b>
Кол-во сбрасываний	5 (5)		5 (3)	3 (3)	
Крепость породы	4 (7)	4 (4)	3 (3)	2 (3)	2 (3)
Энергия дробления, Дж	72,7 (72,7)		43,6 (43,6)		
Поверхность образ. в рез-те цикла(ов), м <sup>2</sup>	- -	0,002975 (0,00889)	0,005529 (0,02864)	0,006484 (0,02878)	0,008562 (0,04125)
Площадь образованной поверхности после дробления с учетом влияния циклов (общая), м <sup>2</sup>	0,016872 (0,01866)	0,017592 (0,03122)	0,016946 (0,03705)	0,021189 (0,03653)	0,024371 (0,04935)
Энергоемкость дробления, Дж/м <sup>2</sup>	<b>4308,52</b> <b>(3894,9)</b>	<b>4131,99</b> <b>(2328,7)</b>	<b>2573,83</b> <b>(1177,3)</b>	<b>2058,42</b> <b>(1193,8)</b>	<b>1789,64</b> <b>(883,7)</b>

В дальнейшем после проведения дробления, а также расчетов крепости породы и площади вновь образованной поверхности (по формуле 1), используя данные по затраченной на дробление энергии определяли поверхностную энергоемкость процесса механического дробления по формуле (4) [3]. В табл. 2 приведены результирующие данные, полученные в ходе исследования.

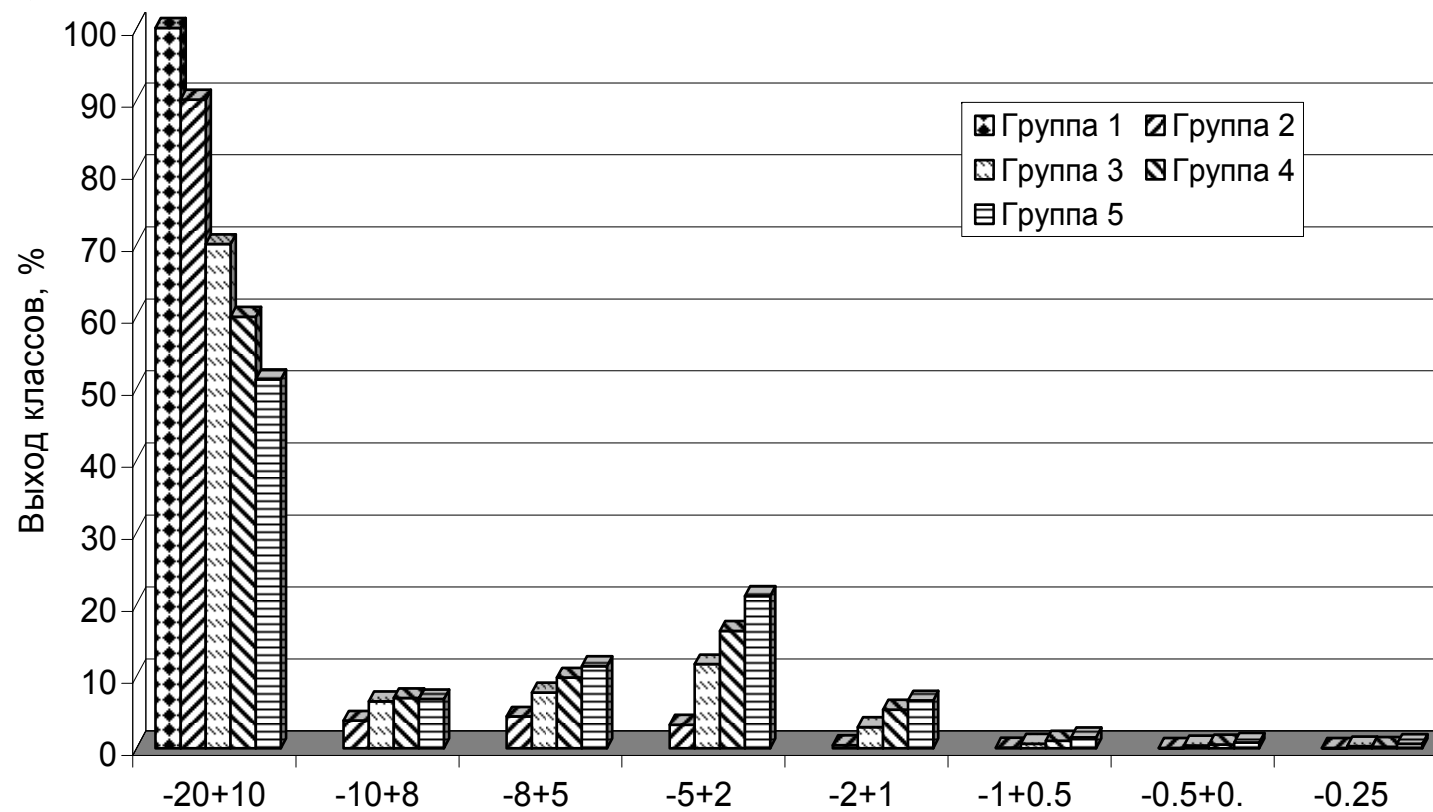
$$\mathcal{E}_n = \frac{E}{\Delta S} \quad (4)$$

где  $E$  – энергия затраченная на дробление, Дж;  $\Delta S$  – площадь образованной при дроблении поверхности, м<sup>2</sup>.

Как видно из рис. 5, на котором приведено сравнение двух серий опытов, затраты энергии на дробление горной породы после воздействия 3-5 циклов замораживания-оттаивания снижаются в два раза. Снижение энергоемкости дробления, а также крепости породы обуславливается развитием различных дефектов в испытуемых образцах в результате воздействия на них циклов замораживания-оттаивания.

Анализируя результаты опытов различных групп второй серии при селективном дроблении мы наглядно видим, что воздействие первого цикла замораживания-оттаивания привело к значительному ослаблению кусков горной породы, которые легко разрушились в дальнейшем при дроблении, кривая ДР1 на рис. 6, класс крупности -20+10 мм. В последствии, начиная уже со 2 группы энергозатраты на дробление возрастают, т.к. оставшийся материал идущий на дробление обладал дефектами в меньшей степени, чем первоначальный. Кривая ДР2 изображенная здесь же, соответствует дроблению класса -10+5 мм, большую энергоемкость в отличие от ДР1 можно объяснить классом крупности материала идущем на дробление, как известно, чем меньше структурное звено, тем оно прочнее. Здесь колебания графика также легко объясняется: при превышении критического уровня накопления различных дефектов происходит разрушение образцов, вследствие чего энергоемкость процесса дробления

а)



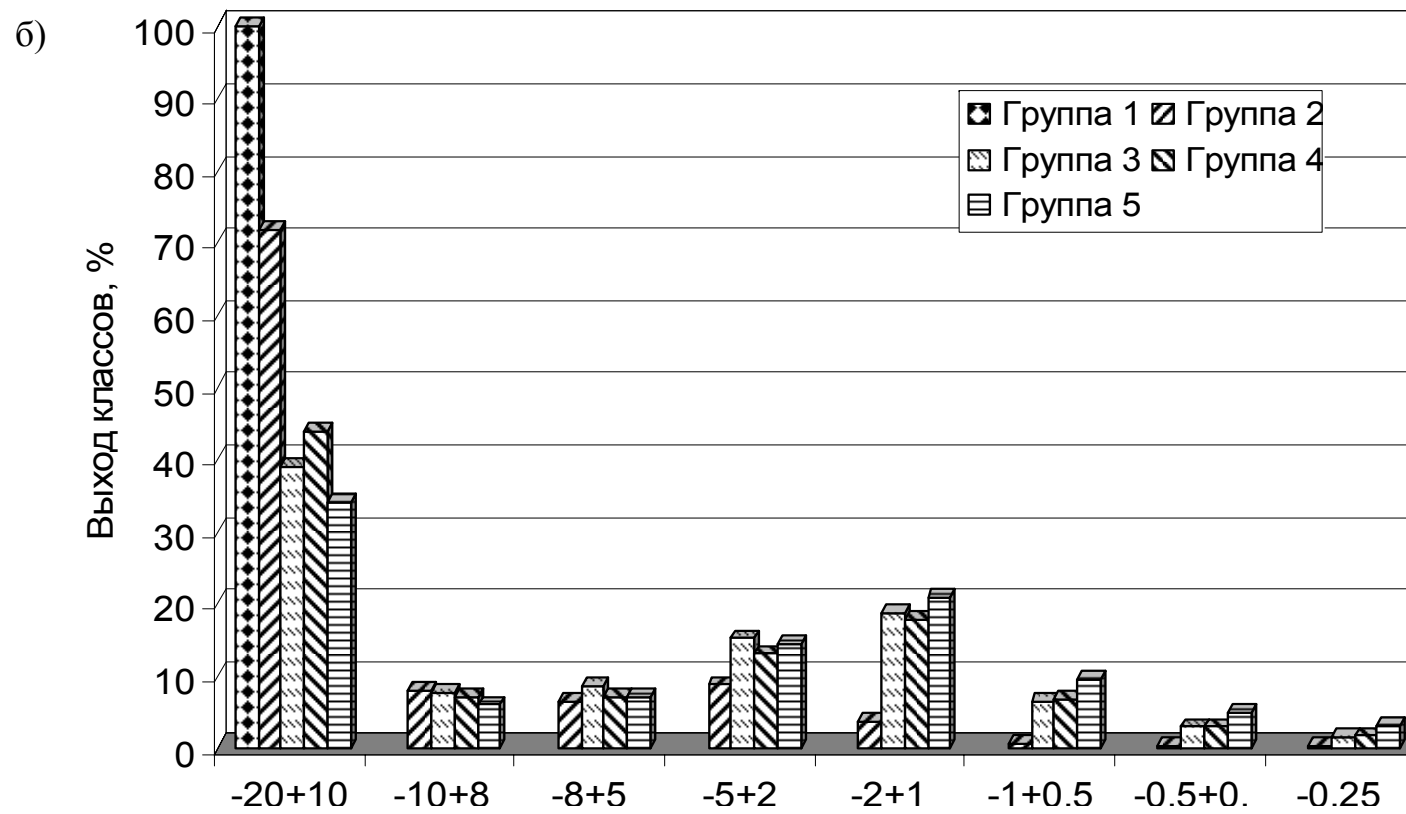
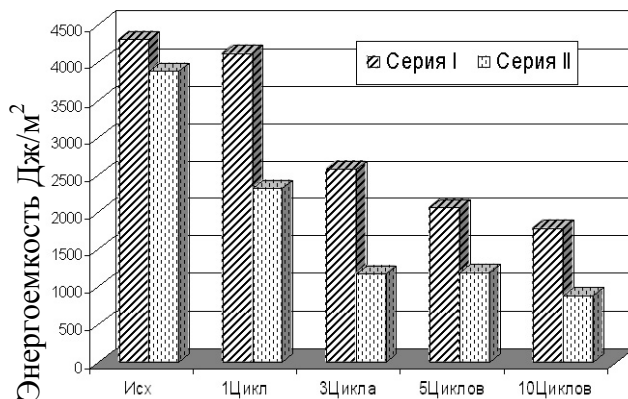
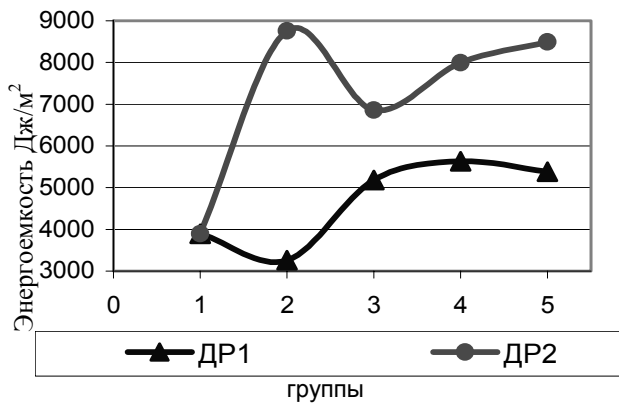


Рис. 3. Результаты ситового анализа I (а) и II (б) серий



**Рис. 5. Энергоемкость процесса дробления**



**Рис. 6. Энергоемкость серии II при селективном дроблении**

снижается. В дальнейших циклах вновь происходит накопление этих же дефектов, во время чего энергоемкость дробления повышается.

Результаты проведенного исследования позволяют сделать вывод о снижении энергоемкости процесса разрушения после воздействия циклов замораживания-оттаивания на образцы горных пород, что может послужить основой для разработки энергосберегающих технологий обогащения и переработки, в том числе, для алмазосодержащих руд, обеспечивающих сохранность кристаллов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кикаева О.Ш. Контроль качества при изготовлении строительных материалов. – М.: Стройиздат, 1987 г. – 111 с.
2. Гончаров С.А., Дмитриев А.П. Термодинамические процессы в горных породах. – М.: Недра, 1983 г. – 312 с.
3. Каркашадзе Г.Г. Механическое разрушение горных пород. – М.: Из-во МГТУ, 2004. – 222 с.
4. Барон Л.И., Коняшин Ю.Г., Курбатов В.М. Дробимость горных пород. – М.: Из-во Академии Наук СССР, 1963. – 168 с.

ГИАБ

#### Коротко об авторе

Захаров Е.В. – младший научный сотрудник лаборатории горной теплофизики ИГДС им. Н.В. Черского СО РАН, г. Якутск.