

УДК 622.02:622'1 (001)

**К ОЦЕНКЕ ПОКАЗАТЕЛЯ ТРУДНОСТИ ЭКСКАВАЦИИ  
СМЕРЗАЮЩЕГОСЯ ВЗОРВАННОГО МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД**

**С. В. Панишев, Е. Л. Алькова, М. С. Максимов**

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

Установлены закономерности изменения механических характеристик неоднородной структуры смерзшихся геоматериалов в зависимости от гранулометрического состава, температуры, влажности и плотности упаковки образца. Выявлено, что основное влияние на прочность на срез, угол внутреннего трения и сцепление в образцах, структурно сопоставимых со взорванным массивом, оказывают температура, влажность и уплотнение. В диапазоне среднего размера включений образца 10–40 мм угол внутреннего трения снижается в ~2 раза, а показатель структурного сцепления во столько же раз увеличивается. Показано, что взорванный массив многолетнемерзлых пород, склонный к повторному смерзанию, является сложной средой, обладающей свойствами нарушенного и однородного массива.

*Смерзание, прочность на срез, угол внутреннего трения, структурное сцепление, показатель трудности экскавации*

DOI: 10.15372/FTPRPI20190304

В условиях многолетней мерзлоты подготовку к выемке мерзлого массива горных пород ведут буровзрывными работами. При этом массив не только разрушается, но и частично растепляется, что приводит к его смерзанию через некоторое время. Прочность его значительно увеличивается, осложняя работу горной техники.

Академиком В. В. Ржевским разработана классификация горных пород по трудности экскавации  $\Pi_3$  для пород в массиве и для разрушенных (взорванных) пород [1]. Все горные породы делятся на 10 классов. При выемке из массива мягких, плотных и полускальных пород показатель трудности экскавации находится из выражения

$$\Pi'_3 = 0.3\lambda(0.2\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) + 0.3\gamma g, \quad (1)$$

где  $\lambda$  — коэффициент структурного ослабления пород в массиве в направлении копания;  $\sigma_1 - \sigma_3$  — пределы прочности соответственно при сжатии, сдвиге и растяжении, МПа;  $\gamma$  — плотность породы, кг/м<sup>3</sup>;  $g$  — ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>.

Для оценки трудности экскавации разрушенного массива предложено аналитическое выражение, учитывающее коэффициент разрыхления и прочность породы на срез. Относительный показатель трудности экскавации для разрушенных пород определяется как

$$\Pi_3'' = 0.22 \left( A + 10 \frac{A}{K_p^9} \right), \quad A = \gamma d_1 + 0.1 \sigma_1, \quad (2)$$

$K_p$  — коэффициент разрыхления породы в развале;  $\sigma_1$  — предел прочности на сдвиг, МПа;  $d_1$  — средний размер кусков разрушенной породы в развале, см;  $\gamma$  — плотность породы, кг/дм<sup>3</sup>.

Несмотря на детальную классификацию, научно обоснованного подхода к категорированию взорванного массива, склонного к повторному смерзанию, по трудности экскавации и определению его прочностных характеристик не существует. Это отрицательно сказывается на правильном выборе оборудования, технологии разработки смерзшейся горной массы и достоверном прогнозе эффективности работы выемочной техники.

Изучение прочностных характеристик грунтов по разным направлениям ведется много лет [2–6]. Так, в результате исследования механических свойств мерзлых грунтово-бетонных сопряжений получены данные, характеризующие взаимосвязь прочности на сдвиг с нормальным давлением, температурой и содержанием влаги [2, 3]. Установлено, что прочность на сдвиг изменяется линейно по отношению к нормальному давлению и температуре, но нелинейно зависит от содержания влаги.

Натурные наблюдения температурных характеристик взорванного массива описаны в [4]. Лишь немногие исследования посвящены оценке факторов, влияющих на прочность смерзания мерзлых пород [7]. В настоящее время отсутствуют какие-либо физико-технологические модели, отражающие кусковатость, температурно-влажностный режим и прочностные характеристики взорванного массива многолетнемерзлых горных пород.

Предел прочности на срез (сдвиг) — важная прочностная характеристика горных пород, влияющих на показатель трудности экскавации. В свою очередь сопротивление мерзлых пород срезу характеризуется силами сцепления и внутреннего трения и зависит от нормального давления. Структурное сцепление возникает при высокой плотности породы и обуславливается взаимным зацеплением зерен, а угол внутреннего трения зависит от влажности породы [8, 9].

Цель настоящей работы — определение основных механических свойств взорванного массива смерзающихся вскрышных пород и оценка его экскавируемости. Для получения в лабораторных условиях прочностных характеристик смерзающихся горных пород разработана специальная методика, разработан и сконструирован стенд для проведения исследований прочности смерзшихся пород на срез [10].

На первом этапе работ по полученным экспериментальным данным прочности на срез и рассчитанным пределам прочности на сжатие и растяжение выполнена оценка показателя трудности экскавации для условий однородной среды (выемка из массива). Испытаниям подвергались образцы однородной структуры без уплотнения и с уплотнением нагрузкой 1.6–3.1 МПа, что примерно соответствует состоянию массива в его верхней части (близко к поверхности), средней — на глубине 10 м и нижней части массива на глубине ~20 м применительно к условиям вскрышных пород Кангаласского бурогоугольного месторождения.

Расчеты показали, что для неуплотненных образцов однородной структуры различной влажности и температуры показатель трудности экскавации  $\Pi_3$  составляет 0–3, что соответствует классу экскавируемости I по классификации Ржевского. При уплотнении пород в образце с нагрузкой 1.6–3.1 МПа прочностные характеристики образца увеличиваются, вследствие чего возрастает показатель трудности экскавации (рис. 1). Породы при влажности 15 %, температуре замерзания –15 °С и уплотнении нагрузкой 3.1 МПа относятся по трудности к классу экскавации V.

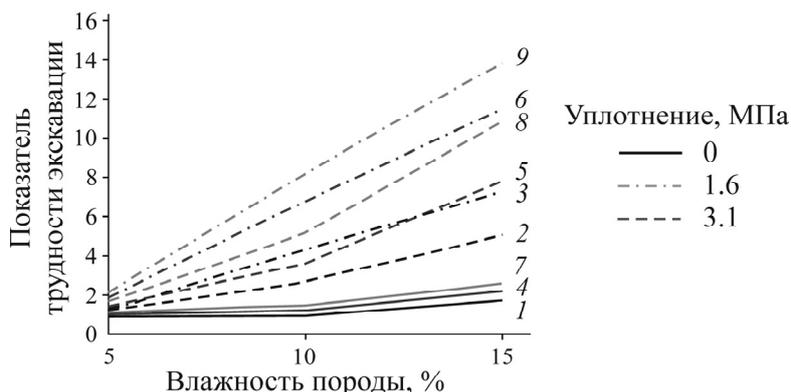


Рис. 1. Изменение показателя трудности экскавации породы (выемка из массива) в зависимости от влажности, плотности пород и температуры:  $-5^{\circ}\text{C}$  (1–3),  $-10^{\circ}\text{C}$  (4–6),  $-15^{\circ}\text{C}$  (7–9)

Для определения основных механических характеристик взорванного массива смерзающихся вскрышных пород выполнена вторая серия экспериментов. Они отличались тем, что оценка прочности породы на срез в условиях повторного смерзания проводилась на образцах геоматериалов большого размера, структурно сопоставимых со взорванным массивом [11]. Образец представлял собой смороженное связующее с включениями (кубиками) заданного размера. Использовалась специально разработанная методика исследования прочности смерзшихся вскрышных горных пород на срез [10].

Исходным материалом служили вскрышные породы, представленные песками и песчаниками Кангаласского месторождения бурых углей, т. е. включениями и связующими был один и тот же материал. Метод исследований — лабораторные испытания подготовленных образцов, не имеющих плоскости смерзания, на срез в специально разработанном и сконструированном в ИГДС СО РАН стенде.

Основной элемент стенда — срезная коробка, состоящая из подвижной и неподвижной обойм, с внутренним диаметром 350 мм и высотой 175 мм. Масса одного образца, применительно к вскрышным породам Кангаласского месторождения, составляла 27 кг. С помощью гидравлического домкрата и ручного насоса создавалась горизонтальная сдвигающая нагрузка. Конструкция сдвигового прибора обеспечивала горизонтальное сдвигающее усилие на образец до 56 тс.

Методикой предусматривалось изготовление образцов нарушенной структуры, различного гранулометрического состава, влажности породы, температуры и величины уплотнения. Образцы в специальной разъемной гильзе замораживались в климатической камере до заданной отрицательной температуры, исходя из условий эксперимента. Контроль температуры осуществлялся с помощью термопары. После замораживания разъемную гильзу разбили и образец подвергали испытанию на стенде. На рис. 2 схематически показан вид сверху изготовленного образца, структурно сопоставимого со взорванным массивом.

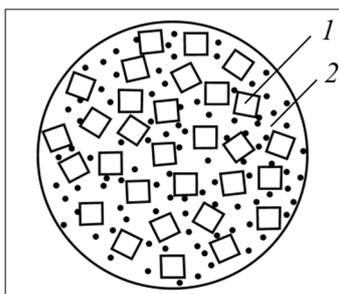


Рис. 2. Вид сверху изготовленного смерзшегося образца, структурно сопоставимого со взорванным массивом горных пород: 1 — включения; 2 — связующее

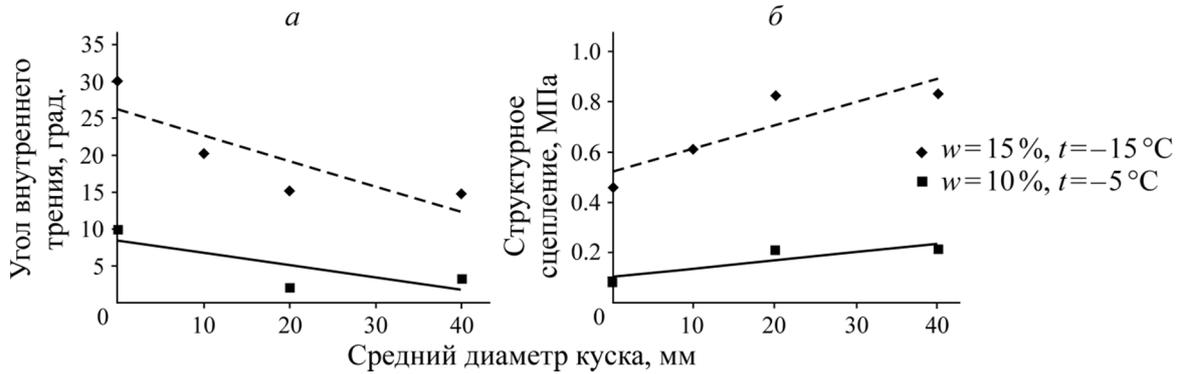


Рис. 3. Изменение угла внутреннего трения (а) и сцепления (б) от размера включений, температуры и влажности породы

Получены сравнительные данные об изменчивости прочности на срез, угла внутреннего трения и сцепления на образцах, структурно сопоставимых со взорванным массивом, — нарушенных образцов с включениями при максимальных и минимальных значениях влажности и температуры в естественном состоянии и подвергшихся уплотнению нагрузками 1.6 и 3.1 МПа. Эти усилия уплотнения соответствуют примерным условиям сжимающего давления пород на глубинах 10 и 20 м от поверхности развала взорванной горной массы применительно к вскрышным породам Кангаласского бурогоугольного месторождения.

На рис. 3 показаны зависимости изменения угла внутреннего трения и сцепления от размера включений, влажности и температуры породы. Испытания проводились при влажности образцов 10, 15 % и температуре –5, –15 °С. По условию повторного смерзания образцов в результате их подготовки для вскрышных пород Кангаласского месторождения установлена критическая влажность, при которой смерзание не происходит. Для исследуемых пород она составила 5 %. Подготовленные образцы с такой влажностью не смерзались даже при –15 °С.

Анализ полученных данных показал, что по сравнению с образцами однородной структуры при увеличении среднего размера включений до 40 мм угол внутреннего трения снижается в ~2 раза, а структурное сцепление во столько же раз увеличивается. В диапазоне размеров включений 20–40 мм при температуре замерзания породы в образце –5 ÷ –15°С и влажности 10–15 % снижение угла внутреннего трения незначительно.

По результатам лабораторных экспериментов получены зависимости предела прочности на срез от температуры смерзания породы и влажности образцов (рис. 4). При влажности породы 5 % образцы не смерзались и проведение эксперимента не представлялось возможным. Поэтому за начало отсчета по оси У принят предел прочности на срез, равный нулю.

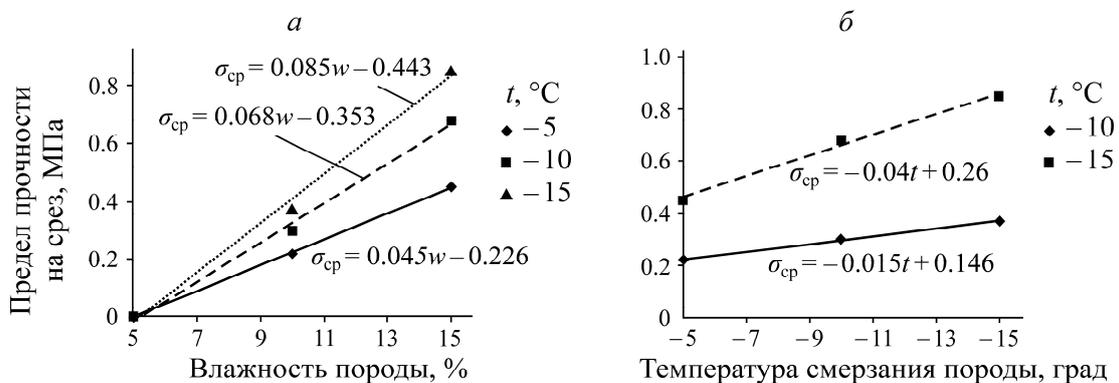


Рис. 4. Зависимость прочности на срез от влажности (а) и температуры (б) смерзания породы

Полученные данные позволяют интерпретировать выражение (2) для расчета показателя трудности экскавации по пределу прочности на срез во взаимосвязи с влажностью разрабатываемого смерзающегося взорванного массива горных пород в исследуемом диапазоне изменчивости влияющих факторов (влажности пород 10–15 % и температуры –5 ÷ –15 °С):

$$\Pi_3'' = 0.022 \left( \gamma d_{cp} + 0.1 \sigma_{cp} + 10 \frac{\gamma d_{cp} + 0.1 \sigma_{cp}}{K_p^9} \right), \quad \sigma_{cp} = K_1 w - K_2,$$

где  $K_1, K_2$  — эмпирические коэффициенты, зависящие от температуры породы.

Установлено, что при уплотнении образцов нарушенной структуры до 3.1 МПа значения прочности на срез становятся сопоставимы с прочностными характеристиками однородного массива. При влажности 15 % и температуре замерзания породы –15 °С предел прочности на срез смерзшихся разрушенных пород составляет 1.67–1.76 МПа в зависимости от среднего куска. Это сопоставимо с пределом прочности на срез образца однородной структуры в тех же диапазонах температуры и влажности и нагрузки 1.6 МПа (таблица).

Изменение показателя трудности экскавации при различных условиях состояния массива (влажность породы 15 %, температура –15 °С)

Параметр	Однородная структура, $P=1.6$ МПа	Нарушенная структура, мм (нагрузка $P=1.6$ МПа)			Нарушенная структура, мм (нагрузка $P=3.1$ МПа)		
		40	20	10	40	20	10
Предел прочности на срез, МПа	1.65	1.22	1.52	1.20	1.67	1.74	1.76
Показатель трудности экскавации	10.81	4.48	2.17	1.18	$\frac{4.73}{10.99^*}$	$\frac{2.3}{11.4^*}$	$\frac{1.15}{11.50^*}$

\*Показатель трудности экскавации, рассчитанный по формуле для выемки из однородного массива

Можно сделать вывод, что расчет показателя трудности экскавации по формуле (2) в условиях максимальных нагрузок (3.1 МПа) нецелесообразен, так как приводит к занижению  $\Pi_3$ , что не соответствует действительности. Предел прочности на срез при этом соответствует условиям однородной структуры, что предполагает использование для расчета  $\Pi_3$  выражения для выемки из массива мягких, плотных и полускальных пород (1).

На рис. 5 показаны взаимосвязи расчетного показателя трудности экскавации с влажностью, температурой смерзания породы и средним диаметром куска.

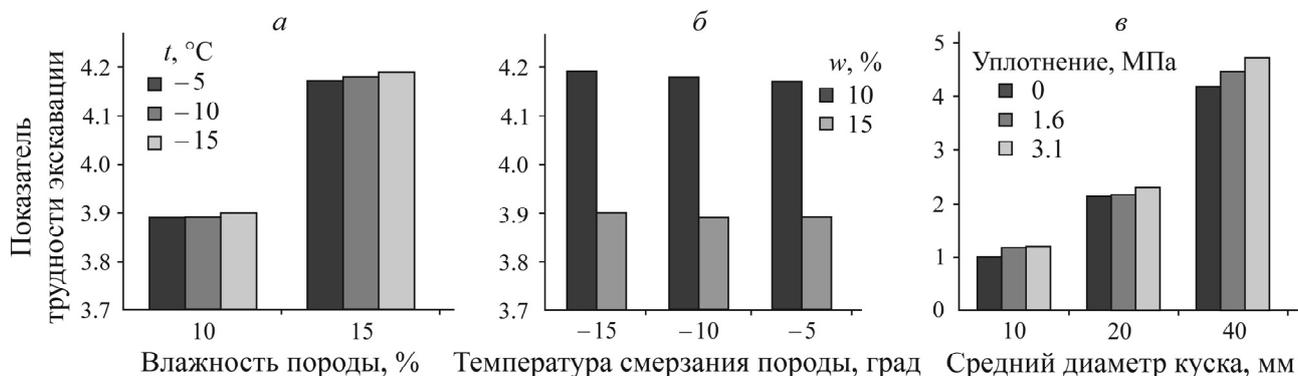


Рис. 5. Зависимость показателя трудности экскавации от влажности породы (а), температуры смерзания породы (б), среднего диаметра куска и уплотнения породы (в)

Основное влияние на формирование прочности смерзающегося образца, а следовательно, и на показатель трудности экскавации оказывают влажность и гранулометрический состав. При росте влажности на 5% показатель трудности увеличивается на 7%. При изменении температуры смерзания с  $-5$  до  $-15$  °С данный показатель изменяется незначительно, а предел прочности на срез увеличивается в 1.7–1.9 раз.

#### ВЫВОДЫ

Взорванный массив многолетнемерзлых пород, склонный к повторному смерзанию, является сложной средой, обладающей свойствами нарушенного и однородного массива. Верхнюю часть развала взорванной породы в условиях незначительных усилий нормального давления по высоте можно отнести к разрушенной, а нижняя часть развала породы в условиях более значительного давления обладает свойствами однородной среды. Это необходимо учитывать при определении показателя трудности экскавации взорванного смерзающегося массива горных пород. Важными факторами, влияющими на прочность на срез, угол внутреннего трения и сцепление в образцах, структурно сопоставимых со взорванным массивом, являются температура, влажность и уплотнение. Результаты настоящих исследований служат дальнейшему раскрытию механизма формирования прочностных характеристик смерзающейся взорванной горной массы в условиях месторождений криолитозоны.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ржевский В. В. Процессы открытых горных работ. — М.: Недра, 1978. — 541 с.
2. Liu J., Lv P., Cui Y., and Liu J. Experimental study on direct shear behavior of frozen soil-concrete interface, Cold Regions Sci. and Tech., 2014, Vol. 104–105. — P. 1–6.
3. Lu P. and Liu J. An experimental study on direct shear tests of frozen soil-concrete interface Tiedao Xuebao, J. of the China Railway Society, 2015, Vol. 37, Issue 2. — P. 106–110.
4. Panishev S. V. and Kaimonov M. V. Technical approach to prediction of dragline productiveness in blasted rock handling at open pit mines in permafrost zone, J. of Min. Sci., 2018, Vol. 53, No. 4. — P. 702–707.
5. Anvari S. M., Shooshpasha I., and Kutanaei S. S. Effect of granulated rubber on shear strength of fine-grained sand, J. of Rock Mech. and Geotech. Eng., 2017, Vol. 9, Issue 5. — P. 936–944.
6. Цирель С. В., Гапонов Ю. С., Павлович А. А. Гранулометрический состав, сдвиговая прочность разрушенных горных пород и их влияние на устойчивость отвалов // ГИАБ. — 2013. — № 12. — 12 с.
7. Винокуров А. П. Исследование процессов смерзаемости горных пород в условиях месторождений криолитозоны // ГИАБ. — 2011. — № 10. — С. 75–82.
8. Маслов Н. Н. Инженерная геология. — М.: Стройиздат, 1941. — 431 с.
9. Вакулин А. А. Основы геокриологии. — Тюмень: ТюмГУ, 2011. — 220 с.
10. Алькова Е. Л., Панишев С. В., Козлов Д. С., Максимов М. С. Экспериментальные исследования прочности на срез мерзлых горных пород на образцах большого размера // Успехи современного естествознания. — 2016. — № 8. — С. 145–149.
11. Пат. 2629610 РФ, МПК G01N 33/24 (2006/01), B28B 11/06 (2006/01). Способ изготовления смерзшихся образцов, структурно сопоставимых с взорванным массивом горных пород / С. В. Панишев, С. А. Ермаков, Е. Л. Алькова, М. С. Максимов, Д. С. Козлов // Оpubл. в БИ. — 2017. — № 25. — 7 с.

*Поступила в редакцию 16/V 2019*

*После доработки 16/V 2019*

*Принята к публикации 28/V 2019*