

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СВОЙСТВ ВЗОРВАННОГО МАССИВА МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ГОРНЫХ ПОРОД НА ОТНОСИТЕЛЬНЫЙ ПОКАЗАТЕЛЬ ТРУДНОСТИ ЭКСКАВАЦИИ

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

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

Ключевые слова: смерзание, прочность на срез, вскрышные породы, включения, многолетнемерзлые горные породы, взорванный массив, трудность экскавации.

Аннотация. В статье представлены экспериментальные исследования влияния температуры, влажности, размера среднего куска и плотности упаковки взорванного смерзающегося массива многолетнемерзлых горных пород на показатель трудности экскавации. Исследования проведены на специализированном лабораторном стенде, отличительной особенностью которого являются образцы большого размера, имитирующие однородный и разрушенный массив. Представлены зависимости изменения прочности, и как следствие показателя трудности экскавации при различном температурно-влажностном режиме горных пород, а так же при различном давления толщии пород в развале по высоте. Отмечено, что для взорванного смерзающегося массива многолетнемерзлых горных пород в условиях изменчивости влажности, низких температур, а также плотности упаковки, расчет относительного показателя трудности экскавации необходимо корректировать с учетом вышеуказанных основных влияющих факторов.

STUDY OF THE INFLUENCE OF BLASTED PERMAFROST ROCK MASS PROPERTIES ON THE RELATIVE INDEX OF EXCAVATION DIFFICULTY

Alkova E.L., Panishev S.V., Maksimov M.S.

*N.V. Chersky Institute of Mining of the North of Siberian Branch of the Russian Academy of Science,
Yakutsk*

Keywords: freezing, shear strength, overburden, inclusions, permafrost rocks, blasted massif, difficulty of excavation.

Abstract. The article presents experimental studies of the influence of temperature, humidity, average piece size and packing density of blasted frozen massif of permafrost rocks on the excavation difficulty index. The studies were conducted on a specialized laboratory stand, the distinctive feature of which is large-sized samples simulating a homogeneous and destroyed massif. The dependences of the change in strength, and as a consequence the excavation difficulty index under different temperature and humidity conditions of rocks, as well as under different pressure of the rock mass in the collapse by height are presented. It is noted that for blasted freezing massif of permafrost rocks under conditions of variability in humidity, low temperatures, and packing density, the calculation of the relative excavation difficulty index must be adjusted taking into account the above-mentioned main influencing factors.

Введение

Республика Саха (Якутия) – важнейший горнодобывающий регион Российской Федерации, где ведется разработка месторождений полезных ископаемых в суровых природно-климатических условиях в зоне многолетней мерзлоты, что накладывает особое отношение как к выбору эффективной технологии отработки месторождений, так и к выбору горной техники.

В своих исследованиях ученые подчеркивают, что применение специализированного оборудования должно соответствовать конкретным горно-геологическим условиям, что является основой долговечности и эффективности использования оборудования [1-3].

От состояния пород зависит, как будет проходить процесс копания, который характеризуется величиной удельного сопротивления копания. Когда имеем дело с мерзлыми породами, характеризующимися значительной влажностью и отрицательной температурой, то удельное сопротивление копания в несколько раз выше, чем сопротивление тех же пород в талом состоянии. Таким образом, эффективность выемки напрямую зависит от

физико-технических характеристик горных пород и от правильно выбранной выемочной техники. Профессором Ржевским В.В., в свое время, было предложен относительный показатель трудности экскавации породы Π , [4], как физико-техническая основа сопоставления пород по экскавируемости. Данный показатель рассчитывается по двум эмпирическим формулам, в зависимости от свойств и состояния пород: выемка из однородного массива и выемка уже разрушенных пород. В предложенной классификации по экскавируемости все горные породы делятся на 10 категорий.

Относительный показатель трудности экскавации является важным инструментом для оценки сложности разработки различных типов горных пород. Данный показатель позволяет провести количественную оценку затрат и усилий, необходимых для экскавации, что критически важно для оптимизации производственных процессов, расчета затрат и выбора подходящей техники и оборудования [5]. В данной статье показаны исследования изменения относительного показателя трудности экскавации при различном состоянии горных пород, с особым акцентом на мерзлые горные породы, как одну из самых сложных категорий для разработки.

Существует несколько подходов к расчету показателя трудности экскавации, которые базируются на комплексном учете механических свойств пород, а также на применяемом оборудовании и методах разработки. Наиболее распространенные из них: это единые нормы выработки [6] и относительный показатель трудности экскавации, предложенный Ржевским В.В. При этом, для мерзлых пород, рассчитанный показатель трудности увеличивают на одну категорию. Кроме того, определяют категорию пород один раз для всего месторождения на весь период его отработки, не учитывая особенностей разработки взорванного смерзающегося массива многолетнемерзлых горных пород (ММГП) и изменчивость его свойств в процессе отработки. Актуальность этого вопроса усиливается тем, что в научной литературе не встречаются исследования влияния различного состояния разрушенных, но повторно смерзающихся пород на относительный показатель трудности экскавации.

Материалы и методы исследований

В Институте горного дела Севера им. Черского Н.В. проводятся исследования, позволяющие установить предел прочности на срез при различных параметрах температуры, влажности, плотности и грансостава пород на специальном стенде [7]. Так как данный показатель прочности используется в математических формулах Ржевского наряду коэффициентом разрыхления и размером разрушенного куска:

$$\Pi'_s = 0,022(A + 10 \frac{A}{K_p^9}), \quad A = \gamma d_{cp} + 0,1\sigma_{сдв}, \quad (1)$$

где K_p – коэффициент разрыхления породы в развале; $\sigma_{сдв}$ – предел прочности на сдвиг, МПа; d_{cp} – средний размер кусков разрушенной породы в развале, см; γ – плотность породы в кг/дм³.

При выемке из массива мягких, плотных и полускальных пород показатель трудности экскавации определяется из выражения:

$$\Pi'_s = 0,3\lambda(0,2\sigma_{сж} + \sigma_{сдв} + \sigma_{раст}) + 0,3\gamma g, \quad (2)$$

где λ – коэффициент структурного ослабления пород в массиве в направлении копания; $\sigma_{сж}$, $\sigma_{сдв}$, $\sigma_{раст}$ – пределы прочности соответственно при сжатии, сдвиге и растяжении, МПа; γ – плотность породы, кг/м³, g – ускорение свободного падения, м/с².

Исследования, проведенные авторами статьи, показали, что данный подход не дает полной картины категорирования взорванного массива склонного к повторному смерзанию по показателю трудности экскавации, особенно во взаимосвязи с различным температурно-влажностным режимом горных пород и в условиях различного давления толщи пород в развале по высоте.

Прочность породы на сдвиг играет не маловажную роль в экскавации. Причем, как установлено исследованиями, изменение влажности существенно влияет на прочность

породы, так как замерзшая вода в порах действует как цементирующий материал, связывая частицы породы и делая её более твёрдой. Температура мёрзлой породы напрямую влияет на возможность её эффективной экскавации как в разрушенном, так и в ненарушенном состоянии. При температуре ниже -10°C породы становятся крайне твёрдыми, что приводит к значительному увеличению прочности пород. Низкая температура способствует увеличению ее прочности.

Целью настоящих исследований является определение влияния температуры, влажности, размера среднего куска и плотности упаковки взорванного, смерзающихся массива многолетнемерзлых горных пород на прочность на срез и, как следствие, на относительный показатель трудности экскавации.

Для достижения данной цели в лабораторных условиях были исследованы образцы, структурно сопоставимые, как с взорванным массивом, так и с однородным. Для этого использовались вскрышные породы угольного месторождения Кангалассы, представленные песками и песчаниками.

Ранее в ИГДС СО РАН проводились исследования процессов смерзания многолетнемерзлых горных пород [8]. Исследования авторов данной статьи отличаются тем, что испытания проводились на больших образцах [9], диаметром 35 см и высотой 17,5 см.

Испытания образцов однородной структуры были проведены при различных значениях температуры замерзания породы (от -5 до -15°C), влажности от 5 до 15% и различном уплотнении породы в образце. При проведении буровзрывных работ высота развала составляет 20 м. Исходя из этого принято, что породы подвергаются в развале различному давлению: без уплотнения на поверхности, на глубине 10 м – 1,6 МПа и на глубине 20 м – 3,1 МПа применительно к условиям Кангаласского месторождения. Поэтому и образцы подвергались различному уплотнению.

Полученные экспериментальные данные позволили рассчитать относительный показатель трудности для однородной среды, т.е. выемка из массива (рис. 1).

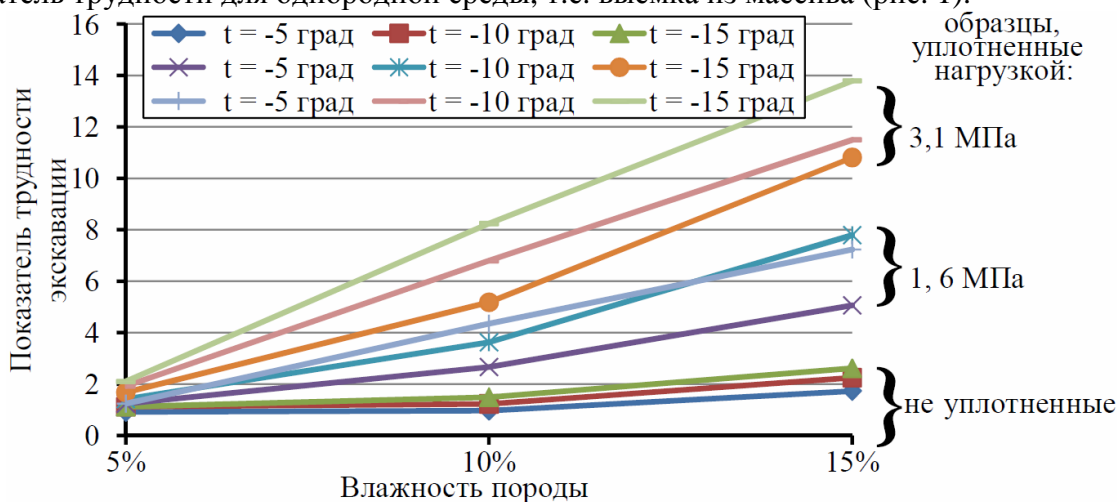


Рис. 1. Изменение показателя трудности экскавации породы (выемка из массива) в зависимости от влажности, температуры и плотности пород

Породы, находящиеся на поверхности развала при изменении влажности и температуры смерзания имеют показатель трудности экскавации (P_3) в пределах от 0 до 3, что соответствует I классу экскавируемости в соответствии с классификацией Ржевского В.В (табл. 1), что подтверждается экспериментами с не уплотненными образцами однородной структуры.

При увеличении нагрузки на породы, т.е. уплотнением породы в образце нагрузкой 1,6-3,1 МПа, происходит увеличение прочности породы и, как следствие, возрастание показателя трудности экскавации. Породы влажностью 15% с температурой замерзания -15°C и уплотнения нагрузкой в 3,1 МПа соответствуют V классу по трудности экскавации.

Табл. 1. Фрагмент классификации горных пород в массиве по экскавируемости

Класс	Горные породы	Сопротивление пород сжатию, МПа	Показатель P_3	Сопротивление пород срезу, МПа
I	Сплошные песчаные и неуплотненные мягкие породы; Сильнотрещиноватые плотные породы	Менее 1,47-1,96 4,903-9,81	До 3	От 0,41 до 1,94
II	Сплошные мягкие породы; Плотные породы: среднетрещиноватые, сильнотрещиноватые, Полускальные чрезвычайно трещиноватые породы	1,96-4,903 7,85-11,77 14,71-19,61 29,42-39,23	От 3 до 6	От 2,86 до 4,28
III	Плотные породы: сплошные (практически монолитные), среднетрещиноватые; Наименее прочные сильнотрещиноватые полускальные породы	4,903-7,85 12,75-17,65 19,61-29,42	От 6 до 9	От 5,71 до 6,42
IV	Плотные породы: сплошные, малотрещиноватые; Полускальные сильнотрещиноватые породы средней прочности; Чрезвычайно трещиноватые наименее прочные скальные породы	6,87-11,77 9,81-17,65 29,42-39,23 58,84-78,45	От 9 до 12	От 9,38 до 12,03

По проектным данным Кангаласского буроугольного месторождения, вскрышные породы, представленные песчаниками, имеют показатель трудности экскавации 4,45, глинистые песчаники 10,08 [10], что подтверждает корректность исследований.

Разработка вскрышных пород ведется на месторождении по бестранспортной системе с применением шагающего экскаватора ЭШ-10/70 после буровзрывной подготовки. Трудности возникают с течением времени, когда взорванный массив повторно смерзается из-за наличия влаги и отрицательной температуры, что характерно для многолетнемерзлых пород.

В дальнейших исследованиях испытаниям подверглись образцы, имитирующие взорванный массив. Для этого в однородную матрицу были добавлены смороженные кубики разного размера до 50% от общего объема образца. Образцы испытывались при варьировании параметров температуры, от -5 до -15°C, влажности (10-15%) и плотности упаковки (без уплотнения, уплотнением 1,6 МПа и 3,1 МПа).

Установлено, что наибольшее влияние на формирование прочности имеет влажность пород в образце (рис. 2).

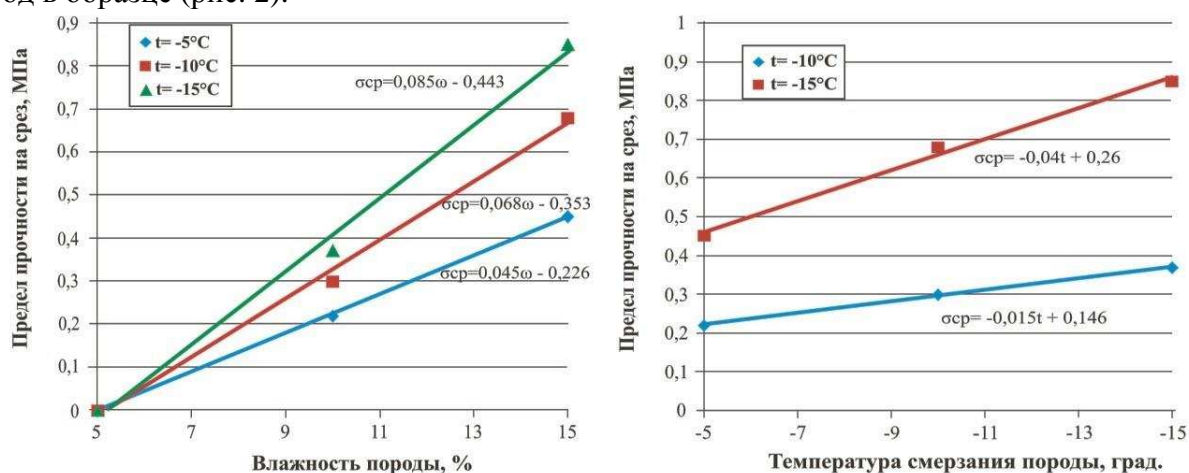


Рис. 2. Зависимость прочности на срез от влажности и температуры породы

Исследованиями установлено, что влажность пород 5% и менее влияния на формирование прочности не имеет, так как образцы при такой влажности не смерзаются.

Выявлено, что при влажности породы в образце 15% и температуре смерзания -15°C прочность становится сопоставима с прочностью однородного массива при уплотнении 1,6 и 3,1 МПа (рис. 3).

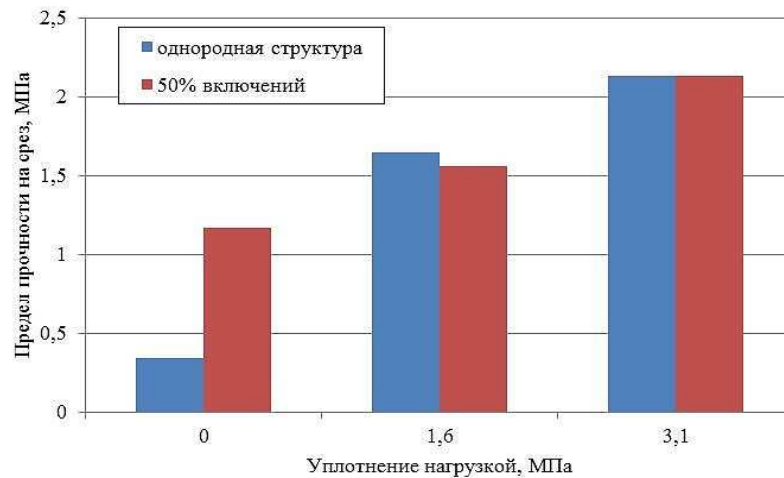


Рис. 3. Зависимость прочности на срез от плотности пород в образце

Полученные результаты ставят под сомнение корректность применения формулы (1) расчета показателя трудности экскавации разрушенного массива для условий повторного смерзания при низких отрицательных температурах и высокой влажности мерзлых пород. В развале, на глубине 10-20 метров разрушенные породы набирают прочность за счет давления вышележащей толщи и замерзания влаги, находящейся в мерзлых породах, растепленной при взрыве.

Установленные зависимости позволили преобразовать выражение (1) расчета показателя трудности экскавации во взаимосвязи с влиянием влажности разрабатываемого смерзающегося взорванного массива (3). Данное выражение является частным примером для конкретных условий отработки (изменчивости влажности пород 10-15% и температуры $-5 \div -15^{\circ}\text{C}$).

$$P_s'' = 0,022(\gamma d_{cp} + 0,1\sigma_{cp} + 10 \frac{\gamma d_{cp} + 0,1\sigma_{cp}}{K_p^9}), \quad (3)$$

где $\sigma_{cp} = k_1 \cdot \omega - k_2$; k_1, k_2 – эмпирические коэффициенты, зависящие от температуры породы.

Рассчитанный показатель трудности экскавации по формуле Ржевского при температуре смерзания породы в образце -15°C , влажности 15% и уплотнении нагрузкой в 3,1 МПа для среднего куска, диаметром 40 мм будет составлять 4,73, тогда как рассчитанный по интерпретированной формуле – 10,99. Что подтверждается практикой, т.к. при выемке нижней части развала приходилось сталкиваться с полной остановкой шагающего экскаватора и привлечении другой техники.

Выводы

Относительный показатель трудности экскавации является ключевым инструментом при выборе выемочной горной техники. Его применение позволяет оптимизировать процесс разработки месторождения, для этого необходимо учитывать состояние разрабатываемого массива. Особенно это актуально в условиях криолитозоны, когда породы находятся в мерзлом состоянии и при проведении буровзрывных пород растепляются, что впоследствии приводит к повторному смерзанию уже разрушенной горной массы и значительно усложняет их отработку.

Финансирование. «Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № 0297-2021-0020, ЕГИСУ НИОКТР № 122011800086-1) с использованием оборудования ЦКП ФИЦ ЯНЦ СО РАН».

Список литературы

1. Печенкин В.Г., Печенкина А.В., Еремеева О.С. Влияние климатических условий на производительность шагающих экскаваторов и бульдозеров при проведении вскрышных работ на россыпных месторождениях золота // Горный журнал. – 2022. – №7. – С. 77-81.
2. Khan A., Asad M.W.A. A method for optimal cut-off grade policy in open pit mining operations under uncertain supply // Resources Policy. 2019, vol. 60, pp. 178-184.
3. Килин Ю.А., Константинов А.В. Повышение производительности шагающих экскаваторов на примере разреза «Назаровский» // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2016. – № 2. – С. 36-42.
4. Ржевский, В.В. Процессы открытых горных работ. – Изд. 3-е, перераб. и доп. – М.: Недра, 1978. – 541 с.
5. Рогальский Б.С., Войтюк Ю.П. Способы определения категории горных пород по трудности экскавации // Вестник Винницкого политехнического института. – 2005. – №6(63). – С. 180-186.
6. Единые нормы выработки на открытые горные работы для предприятий горнодобывающей промышленности. Ч. IV. Экскавация и транспортирование горной массы автосамосвалами. – М., 1989. – 82 с.
7. Панишев С.В., Алькова Е.Л., Максимов М.С. Исследование прочностных характеристик мерзлых образцов однородной и нарушенной структуры // Успехи современного естествознания. – 2018. – №11, ч. 2. – С. 383-388.
8. Винокуров А.П. Исследование процессов смерзаемости горных пород в условиях месторождений криолитозоны // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2011. – № 10. – С. 75-82.
9. Патент № 2629610 РФ 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. – Заявка №2016121595 от 31.05.2016; опубл. 30.08.2017, Бюл. №25.
10. Корректировка горно-транспортной части проекта реконструкции разреза "Кангаласский" (пересмотр 2001 г.): проектная документация 4633-ИОС 1.2. – Владивосток: Мечел, ОАО "ДальвостНИИпроектуголь", 2010. – Т. 3. – 118 с.

References

1. Pechenkin V.G., Pechenkina A.V., Eremeeva O.S. The influence of climatic conditions on the productivity of walking excavators and bulldozers during stripping operations at placer gold deposits // Mining journal. 2022, no.7, pp. 77-81.
2. Khan A., Asad M.W.A. A method for optimal cut-off grade policy in open pit mining operations under uncertain supply // Resources Policy. 2019, vol. 60, pp. 178-184.
3. Kilin Yu.A., Konstantinov A.V. Increasing the productivity of walking excavators using the example of the Nazarovsky open pit // Mining information and analytical bulletin. 2016, no. 2, pp. 36-42.
4. Rzhnevsky V.V. Open pit mining processes. – 3rd ed., revised and add. – М.: Nedra, 1978. – 541 p.
5. Rogal'skiy B.S., Voytyuk Yu.P. Methods for determining the category of rocks by the difficulty of excavation // Bulletin of the Vinnitsa Polytechnic Institute. 2005, no. 6(63), pp. 180-186.
6. Uniform production standards for open-pit mining for mining enterprises. Part IV. Excavation and transportation of rock mass by dump trucks. – М., 1989. – 82 p.
7. Panishev S.V., Alkova E.L., Maksimov M.S. Study of the strength characteristics of frozen samples of homogeneous and disturbed structure // Advances in modern natural science. – 2018, no. 11, part 2, pp. 383-388.
8. Vinokurov A.P. Study of the processes of freezing of rocks in the conditions of cryolithozone deposits // Mining information and analytical bulletin. 2011, no. 10, pp. 75-82.
9. Patent No. 2629610 RU. Method of manufacturing frozen samples structurally comparable to a blasted rock mass / S.V. Panishev, S.A. Ermakov, E.L. Alkova, M.S. Maksimov, D.S. Kozlov. – Appl. No. 2016121595 from 31.05.2016; publ. 30.08.2017, Bul. No. 25.
10. Adjustment of the mining and transport part of the reconstruction project of the Kangalassky open-pit mine (revision of 2001): design documentation 4633-IOS 1.2. – Vladivostok: Mechel, OJSC DalvostNIIproektugol, 2010. – Vol. 3. – 118 p.

Сведения об авторах:

Information about authors:

Алькова Елена Леонидовна – кандидат технических наук, старший научный сотрудник	Alkova Elena Leonidovna – candidate of technical sciences, senior researcher
Панишев Сергей Викторович – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник	Panishev Sergey Viktorovich – candidate of technical sciences, leading researcher
Максимов Михаил Савич – младший научный сотрудник	Maksimov Mikhail Savich – junior researcher
Nelealc12@rambler.ru	

Получена 03.10.2024