УДК 552.08:622.02:620.171.32:622'122

**ЛАБОРАТОРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЧНОСТИ
СМЕРЗШИХСЯ ГОРНЫХ ПОРОД НА СДВИГ****Максимов М.С., Панишев С.В., Козлов Д.С.***Институт горного дела Севера им. Н.В. Черского СО РАН, Якутск,
e-mail: mexes_07@mail.ru, bsdpv@mail.ru*

Для месторождений зоны многолетней мерзлоты характерна отрицательная температура горных пород, предопределяющая необходимость предварительного разрушения буровзрывными работами. Взорванная горная масса вследствие ее отрицательной температуры повторно смерзается. Это значительно осложняет ведение горных работ в таких условиях. Представлены результаты лабораторных исследований прочности смерзшихся горных пород на сдвиг в зависимости от температуры, гранулометрического состава образцов и усилия нормального давления между образцами в условиях постоянной влажности. Эксперименты выполнены по оригинальной методике, отличительной особенностью которой является то, что в процессе проведения эксперимента, при подготовке образцов производится разогрев поверхностей смерживания, чем создается имитация оттайки поверхности кусков горной породы в процессе взрывного разрушения. Изменчивость усилий давления между кусками отбитой породы по глубине развала задавалась различными величинами расчетного нормального давления между поверхностями смерживания образцов. В результате проведения лабораторных экспериментов были получены данные о характере изменения прочности смерзания во взаимосвязи с температурой, гранулометрическим составом и усилием нормального давления между образцами и глубиной растепленного слоя. Исследованиями установлено, что прочность смерзания с увеличением гранулометрического состава и усилием давления между кусками возрастает. При наименьшем усилии нормального давления, соответствующем поверхностному слою развала взорванной породы, прочность смерзания, наоборот, имеет тенденцию к снижению. Показано, что в условиях постоянной влажности с понижением температуры уменьшается толщина растепленного слоя поверхностей смерживания и соответственно прочность смерзания образцов. С ростом величины нормального давления между смерживаемыми образцами прочность смерзания увеличивается.

Ключевые слова: мерзлые горные породы, прочность смерзания, гранулометрический состав, влажность, смерживание мерзлых образцов, глубина растепленного слоя

**LABORATORY RESEARCHES OF THE STRENGTH
OF ADFREEZED ROCKS ON SHEAR****Maksimov M.S., Panishev S.V., Kozlov D.S.***Mining Institute of the North named N.V. Cherskiy, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,
Yakutsk, e-mail: mexes_07@mail.ru, bsdpv@mail.ru*

For deposits in the zone of permafrost, a negative temperature of rocks is typical, which predetermines the need for preliminary destruction by drilling and blasting operations. Exploded mountain mass due to its negative temperature re-freezes. This greatly complicates the conduct of mining operations in such conditions. The results of laboratory researches of the strength of adfrozen rocks on shear depending on the temperature, granulometric composition of samples and the normal pressure force between samples in the conditions of constant humidity are presented. The experiments are carried out according to the original technique, a distinctive feature of which is that, in the course of the experiment, when preparing samples, the freezing surfaces are heated, which creates an imitation of the surface thawing of pieces of rock in the process of explosive destruction. The variability of the efforts of the pressure between the pieces of broken rocks at the depth of the collapse asked various values calculated normal pressure between the surfaces of freezing samples. As a result of laboratory experiments, data were obtained on the character of changes in the strength of freezing in relation to temperature, granulometric composition, and the force of normal pressure between the samples and the depth of the thawed layer. It has been established by investigations that the adfreezing strength with the increase in granulometric composition and the forces of the pressure between the pieces increases. At the lowest normal pressure force, corresponding to the surface layer of the breakup of the blasted rock, the adfreezing strength on the contrary, tends to decrease. It is shown that in conditions of constant humidity with temperature decrease the thickness of the thawed layer of the current surfaces and, accordingly, the strength of freezing samples decreases. With growth of size of normal pressure between frozen samples durability of freezing increases.

Keywords: frozen rocks, adfreezing strength, granulometric composition, humidity, adfreezing of frozen specimens, the depth of the thawed layer

Для месторождений зоны многолетней мерзлоты характерна отрицательная температура горных пород, предопределяющая их повышенную прочность и необходимость предварительного разрушения буровзрывными работами. В процессе взрывного разрушения выделяется некото-

рое количество тепла, приводящее к растеплению поверхностного слоя мерзлых пород и появлению влаги в виде воды или пара в этом слое, которая замерзает за счет аккумулированного в кусках отбитой породы холода, превращая отбитую горную массу в смерзшийся монолит. Это значи-

тельно осложняет ведение горных работ в таких условиях.

Исследования процесса смерзания пород были начаты в нашей стране еще в 1930-х гг. и продолжаются по настоящее время. Из современных исследователей внесших значительный вклад в изучение данной проблематики, можно отметить С.И. Васильева, занимавшегося исследованиями физико-механических свойств и прочностных характеристик мерзлых грунтов [1, 2]. Одним из продолжателей школы механики мерзлых пород является С.С. Волохов. Он исследовал прочность смерзания грунта с различными материалами [3] и в последние годы плотно занимается термореологией мерзлых, промерзающих и протаивающих пород, в частности исследованием механокалорического эффекта в мерзлых грунтах [4]. Интересные результаты по механизму разрушения мерзлых грунтов во взаимосвязи с фазовыми переходами грунтовой влаги получены А.А. Коноваловым [5].

Системное изучение процесса смерзания в Институте горного дела Севера им. Н.В. Черского СО РАН (Якутск) было начато в 1990-х гг. и ведется по настоящее время. Здесь можно отметить работы М.В. Каймонова и А.С. Курилко, направленные на изучение механизма смерзания взорванной горной массы. На основании этих результатов исследований были разработаны рекомендации по предотвращению смерзания отбитой мёрзлой руды в очистных блоках рудников криолитозоны [6]. А.П. Винокуровым было установлено, что в наибольшей степени, на прочность смерзания, оказывают влияние влажность горных пород и глубина растепленного слоя на контакте между кусками, при этом прочность смерзания с понижением температуры и увеличением влажности возрастает [7]. Однако на практике для условий многих месторождений характерна изменчивость гранулометрического состава пород, влажность пород обычно изменяется незначительно, а процесс повторного смерзания мерзлых взорванных пород имеет свои особенности в разные периоды года. Весенне-летний период характеризуется нарастающими положительными температурами окружающего воздуха и интенсивным выделением влаги на поверхности кусков взорванного мерзлого массива за счет солнечной инсоляции. Для осенне-зимнего периода характерны тепловая инерция массива, накопленная ле-

том и низкие отрицательные температуры окружающего воздуха, что в свою очередь замедляет процесс смерзания взорванной горной массы [8]. Поэтому целью исследований было установление взаимосвязей прочности повторного смерзания с температурой пород, толщиной растепленного слоя и усилием нормального давления между кусками в условиях постоянной влажности и изменчивости гранулометрического состава. Метод исследования – эксперимент. Объект исследования – вскрышные породы Кангаласского месторождения бурых углей. Для этой цели была разработана методика лабораторных исследований прочности смерзшихся горных пород на сдвиг в зависимости от их температуры и гранулометрического состава [9].

Методикой исследований предусматривалось определение прочности смерзания при варьировании параметров основных влияющих факторов: температуры и влажности образцов пород, величины растепленного слоя (контактной зоны сморазживания), нормального давления между образцами и плотности упаковки. В процессе испытаний производилось сморазживание мерзлых образцов горных пород, поверхности которых по плоскости смерзания предварительно подвергались искусственной тепловой обработке при температуре 90–100 °С, с расстояния 0,1 м и выдержкой примерно 10 сек., чем создавалась имитация разогрева и оттаивания поверхностного слоя кусков породы при взрыве в натурных условиях. При этом фиксировалась глубина протаявшего слоя. Влажность образцов, была принята постоянной и составляла 15%, что соответствовало средней влажности пород Кангаласского месторождения.

Для оценки влияния плотности упаковки на прочность смерзшихся пород на сдвиг испытания проводились на образцах, подготовленных без уплотнения и с уплотнением. Объемный вес образцов без уплотнения составлял 1,6 г/см³, образцов с уплотнением – 1,8 г/см³. В связи с тем, что усилие нормального давления между кусками отбитой взрывом породы по глубине развала различно, эксперименты проводились при 3-х усилиях давления. Первое усилие N1 соответствовало условиям на глубине развала 1 м, второе N2 – на глубине 12 м и третье N3 – на глубине 20 м (табл. 1). Нагружение образцов нормальным давлением к плоскости смерзания осуществлялось специальным приспособлением.

Таблица 1

Расчетные усилия нормального давления между образцами

Подготовка образца	Усилие нормального давления, кН		
	N1	N2	N3
Без уплотнения	0,039	0,471	0,785
С уплотнением	0,044	0,53	0,883

Таблица 2

Прочность смерзания образцов, подготовленных без уплотнения

Гран. состав образцов, мм	Прочность смерзания, МПа								
	при $t_{\text{см}} -5^{\circ}\text{C}$			при $t_{\text{см}} -10^{\circ}\text{C}$			при $t_{\text{см}} -20^{\circ}\text{C}$		
	при N1	при N2	при N3	при N1	при N2	при N3	при N1	при N2	при N3
0,2–0,1	0,42	0,58	0,69	0,41	0,41	1,03	0,25	0,1	0,15
0,5–0,2	0,55	0,82	0,89	0,11	0,35	0,67	0,14	0,12	0,1
1–0,5	–	–	–	–	–	–	0,14	0,1	0,27

Таблица 3

Прочность смерзания образцов, подготовленных с уплотнением

Гран. состав образцов, мм	Прочность смерзания, МПа								
	при $t_{\text{см}} -5^{\circ}\text{C}$			при $t_{\text{см}} -10^{\circ}\text{C}$			при $t_{\text{см}} -20^{\circ}\text{C}$		
	при N1	при N2	при N3	при N1	при N2	при N3	при N1	при N2	при N3
0,2–0,1	0,55	0,66	0,53	0,39	0,54	0,81	0,19	0,09	0,16
0,5–0,2	0,46	0,65	0,60	0,12	0,31	0,56	0,07	0,08	0,09
1–0,5	–	–	–	–	–	–	0,13	0,14	0,28

В результате лабораторных экспериментов были получены данные о прочности смерзания при температурах смораживания ($t_{\text{см}}$) -5°C , -10°C , -20°C , по гранулометрическим составам 0,2–0,1 мм, 0,5–0,2 мм, 1–0,5 мм, а также при различных усилиях давления между образцами, которые представлены в табл. 2 и 3.

На рис. 1 и 2 представлены зависимости прочности смерзания образцов горных пород с размером фракций 0,2–0,1 мм и 0,5–0,2 мм от температуры смораживания при их влажности 15 %. Установлено, что в диапазоне от -5°C до -20°C прочность смерзания образцов горных пород уменьшается с понижением их температуры. При этом прочнее смерзаются породы с наибольшим усилием нормального давления между образцами. Для фракции 0,2–0,1 мм прочность смерзания образцов горных пород, при понижении температуры от -5°C до -20°C и в зависимости от усилия нормального давления, уменьшается в 1,5–6 раза для образцов без уплотнения, и для уплотненных образцов в 6,5–8 раза. Для фракции 0,5–0,2 мм прочность смерзания образцов горных пород уменьшается от 4 до 9 раз для образцов без уплотнения и для образцов с уплотнением

от 6,5 до 8 раз, в зависимости от усилия нормального давления.

В процессе проведения испытаний образцов было установлено, что максимальные значения прочности смерзания присущи температуре смораживания -10°C и наибольшему усилию нормального давления, при общей тенденции к ее снижению. В наибольшей степени данная особенность отмечена для образцов породы с размером фракций 0,2–0,1 мм и в меньшей степени, для фракции 0,5–0,2 мм.

Исследованиями установлено, что при температуре -20°C прочность смерзания с увеличением гранулометрического состава и нормального давления возрастает. При наименьшем усилие нормального давления (N1), соответствующем поверхностному слою развала взорванной породы, прочность смерзания, наоборот, имеет тенденцию к снижению (рис. 3). С ростом величины нормального давления, соответствующей росту глубины развала, и увеличением гранулометрического состава прочность смерзания увеличивается в 1,5–1,8 раза. Причем наиболее интенсивное увеличение прочности смерзания отмечено для условий, соответствующих максимальной принятой для расчета усилия нормального давления глубине развала взорванной породы (величина N3).

Рис. 1. Зависимость прочности смерзания образцов горных пород с фракцией 0,2–0,1 мм от температуры смерзания при различных усилиях нормального давления: а) образцы без уплотнения, б) образцы с уплотнением

Рис. 2. Зависимость прочности смерзания образцов горных пород с фракцией 0,5–0,2 мм от температуры смерзания при различных усилиях нормального давления: а) образцы без уплотнения, б) образцы с уплотнением

Рис. 3. Зависимость прочности смерзания от гранулометрического состава образцов: а) образцы без уплотнения, б) образцы с уплотнением

Таблица 4

Результаты определения глубины растепления и прочности смерзания

Показатели		Образцы без уплотнения			Образцы с уплотнением		
Фракция 0,2–0,1 мм	Температура смораживания, град	–5	–10	–20	–5	–10	–20
	Глубина растепления, мм	1,98	1,47	1,11	1,69	1,24	1,03
	Прочность смерзания, МПа	0,56	0,62	0,17	0,58	0,58	0,15
Фракция 0,5–0,2 мм	Температура смораживания, град	–5	–10	–20	–5	–10	–20
	Глубина растепления, мм	1,79	1,33	0,83	1,50	1,33	0,78
	Прочность смерзания, МПа	0,75	0,38	0,12	0,57	0,38	0,08

а)

б)

Рис. 4. Взаимосвязь глубины растепленного слоя и прочности смерзания от температуры смораживания образцов (фракция 0,2–0,1 мм):

а) образцы без уплотнения, б) образцы с уплотнением

а)

б)

Рис. 5. Взаимосвязь глубины растепленного слоя и прочности смерзания от температуры смораживания образцов (фракция 0,5–0,2 мм):

а) образцы без уплотнения, б) образцы с уплотнением

В табл. 4 представлены результаты лабораторных экспериментов по определению глубины растепления и прочности смерзания для различных температур, а на рис. 4 и 5 – графики установленных экспериментами взаимосвязей между указанными параметрами.

Как видно из графиков, с понижением температуры уменьшается глубина растепленного слоя и соответственно уменьшается прочность смерзания. Связано это с тем, что при одном и том же времени теплового воздействия поверхности смерзания образцов с более низкой температурой оттаивают в меньшей степени, соответственно, меньше и величина растепленного слоя. При этом толщина растепленного слоя у образцов, подоготовленных без предварительного уплотнения, больше.

Выполненными натурными наблюдениями на разрезе «Кангаласский» было установлено, что при одной и той же отрицательной температуре породы в забое драглайна снижение производительности экскаватора происходит в наибольшей степени в весенний период, что связано с интенсивным выделением влаги на поверхности кусков взорванного мерзлого массива за счет инсоляции. Результаты проведенных исследований помогают более полно раскрыть механизм повторного смерзания взорванной горной массы на месторождениях криолитозоны.

Список литературы

1. Васильев С.И. Исследование прочностных характеристик сезонно-мерзлых грунтов Сибири и Севера / С.И. Васильев // Системы. Методы. Технологии. – 2010. – № 5. – С. 93–99.
2. Васильев С.И. Повышение эффективности разработки сезонно-мерзлых грунтов / С.И. Васильев // Системы. Методы. Технологии. – 2009. – № 3. – С. 96–98.
3. Волохов С.С. Прочность смерзания мерзлых грунтов с материалами трубопроводов / С.С. Волохов // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 2010. – № 5. – С. 25–28.
4. Волохов С.С. Механокалорический эффект в мерзлых грунтах при одноосном сжатии / С.С. Волохов // Криосфера земли. – 2016. – Т. XX, № 1. – С. 30–35.
5. Коновалов А.А. К теории прочности мерзлого грунта / А.А. Коновалов // Криосфера земли. – 2009. – Т. XIII, № 1. – С. 31–39.
6. Каймонов М.В. Влияние теплофизических и технологических факторов на смерзание отбитой горной массы / М.В. Каймонов, Ю.А. Хохолов, А.С. Курилко // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2010. – № ОВ4. – С. 166–175.
7. Винокуров А.П. Исследование процессов смерзаемости горных пород в условиях месторождений криолитозоны / А.П. Винокуров // Горный информационно-аналитический

бюллетень (научно-технический журнал). – 2011. – № 10. – С. 75–82.

8. Панишев С.В. Влияние температурного режима на эффективность разработки вскрышных пород месторождений криолитозоны / С.В. Панишев, С.А. Ермаков // Физ.-техн. пробл. разраб. полез. ископаемых. – 2013. – № 2. – С. 132–138.

9. Панишев С.В. Методика лабораторных исследований прочности смерзшихся горных пород на сдвиг в зависимости от их температуры и гранулометрического состава / С.В. Панишев [и др.] // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2014. – № 3. – С. 23–29.

References

1. Vasil'ev S.I. Investigation of the strength characteristics of seasonally frozen soils of Siberia and the North [Issledovanie prochnostnykh kharakteristik sezonno-merzlykh gruntov Sibiri i Severa]. Sistemy. Metody. Tekhnologii. – Systems. Methods. Technologies, 2010, no. 5, pp. 93–99.
2. Vasil'ev S.I. Increase in the efficiency of development of seasonally frozen soils [Povyshenie effektivnosti razrabotki sezonno-merzlykh gruntov]. Sistemy. Metody. Tekhnologii. – Systems. Methods. Technologies, 2009, no. 3, pp. 96–98.
3. Volokhov S.S. The strength of the freezing of frozen soils with materials of pipelines [Prochnost' smerzaniia merzlykh gruntov s materialami truboprovodov]. Osnovaniia, fundamente i mekhanika gruntov – Soil mechanics and foundation engineering, 2010, no. 5, pp. 25–28.
4. Volokhov S.S. Mechanocaloric effect in frozen soils under uniaxial compression [Mekhanokaloricheskii effekt v merzlykh gruntakh pri odnoosnom szhatii]. Kriosfera zemli – Earth's Cryosphere, 2016, no. 1, pp. 30–35.
5. Konovalov A.A. On the theory of strength of frozen soil [K teorii prochnosti merzlogo grunta]. Kriosfera zemli – Earth's Cryosphere, 2009, no. 1, pp. 31–39.
6. Kaimonov M.V., Khokholov Iu.A., Kurilko A.S. Influence of thermophysical and technological factors on the freezing of broken rock mass [Vliianie teplofizicheskikh i tekhnologicheskikh faktorov na smerzanie otbitoi gornoi massy]. Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten' (nauchno-tekhnicheskii zhurnal) – Mining informational and analytical bulletin (scientific and technical journal), 2010, no. 4, pp. 166–175.
7. Vinokurov A.P. Investigation of the processes of rock congelation in the conditions of deposits of cryolithozone [Issledovanie protsessov smerzaemosti gornykh porod v usloviakh mestorozhdenii kriolitozony]. Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten' (nauchno-tekhnicheskii zhurnal) – Mining informational and analytical bulletin (scientific and technical journal), 2011, no. 10, pp. 75–82.
8. Panishev S.V. Ermakov S.A. The influence of the temperature regime on the efficiency of the development of overburden rocks of the cryolithozone [Vliianie temperaturnogo rezhima na effektivnost' razrabotki vskryshnykh porod mestorozhdenii kriolitozony]. Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh – Journal of mining science, 2013, no. 2, pp. 132–138.
9. Panishev S.V. Ermakov S.A. Kaimonov M.V. Maksimov M.S. Kozlov D.S. The method of laboratory studies of the strength of frozen rocks for shear, depending on their temperature and granulometric composition [Metodika laboratornykh issledovani prochnosti smerzhshixsia gornykh porod na sdivg v zavisimosti ot ikh temperatury i granulometricheskogo sostava]. Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten' (nauchno-tekhnicheskii zhurnal) – Mining informational and analytical bulletin (scientific and technical journal), 2014, no. 3, pp. 23–29.