Алькова Е.Л., Федоров И.В. Методический подход к исследованию процесса резания смерзшегося взорванного массива многолетнемерзлых пород // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. – 2026. – № 40. – С. 151-156.

УДК 622.1:551.34(002) https://doi.org/10.26160/2658-3305-2026-40-151-156

МЕТОДИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ИССЛЕДОВАНИЮ ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ СМЕРЗШЕГОСЯ ВЗОРВАННОГО МАССИВА МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ПОРОД

Алькова Е.Л., Федоров И.В.
Институт горного дела Севера им. Н.В. Черского
Сибирского отделения Российской академии наук, Якутск

Ключевые слова: смерзание, прочность, вскрышные породы, взорванный массив, многолетнемерзлые горные породы, криолитозона, резание мёрзлых пород, экспериментальная установка.
Аннотация. Рассмотрена проблема разработки месторождений полезных ископаемых в северных регионах, где буровзрывные работы остаются основным способом подготовки крепких и мёрзлых пород к выемке. Отмечено, что со временем под действием отрицательных температур и влаги отдельные куски цементируются льдом, и развал превращается в связанную систему. Это приводит к росту сопротивления резанию, увеличению энергозатрат, снижению производительности выемочного оборудования и повышению себестоимости добычи. Существующие исследования резания мёрзлых пород выполнены преимущественно на однородных монолитных или искусственно приготовленных образцах с гравийно-галечниковыми включениями, структура которых не соответствует взорванному массиву, где в качестве включений выступает та же порода в смерзшемся состоянии. Прямых экспериментальных данных о резании именно вторично смерзшегося взорванного массива практически нет. Это делает необходимым изучение процесса резания таких пород в контролируемых лабораторных условиях. Предложен методический подход, в рамках которого объектом исследования становится искусственно сформированный и вторично смерзшийся образец, структурно сопоставимый с взорванным массивом. Варьируются как режимные параметры резания, так и параметры смерзания - температура, влажность, крупность включений, плотность упаковки, время выдержки. Описана схема экспериментальной установки, состав и технология изготовления образцов, диапазоны варьируемых факторов. Обоснована научная и практическая значимость работы.

METHODOLOGICAL APPROACH TO INVESTIGATING THE CUTTING PROCESS OF A BLASTED, FROZEN MASSIF OF PERENNIALLY FROZEN ROCK

Alkova E.L, Fedorov I.V.
N.V. Chersky Mining Institute of the North of the Siberian Branch
of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk

Keywords: freezing together, strength, overburden, blasted rock mass, permafrost rocks, cryolithozone, cutting of frozen rocks, experimental setup.
Abstract. The problem of developing mineral deposits in northern regions, where drilling and blasting remain the main method of preparing hard and frozen rocks for excavation, is considered. It is noted that over time, under the influence of negative temperatures and moisture, individual pieces are cemented by ice, and the blasted mass turns into a bound system. This leads to an increase in cutting resistance, higher energy consumption, reduced productivity of excavation equipment, and increased mining costs. Existing studies of cutting frozen rocks have been performed mainly on homogeneous monolithic or artificially prepared samples with gravel-pebble inclusions, whose structure does not correspond to the blasted rock mass, where the inclusions are the same rock but in a frozen state. Direct experimental data on cutting specifically secondarily frozen blasted rock mass are virtually absent. This makes it necessary to study the cutting process of such rocks under controlled laboratory conditions. A methodology is proposed in which the object of study is an artificially formed and secondarily frozen sample structurally comparable to the blasted rock mass. Both the cutting regime parameters and the freezing parameters are varied – temperature, moisture content, inclusion size, packing density, and holding time. The design of the experimental setup, the composition and manufacturing technology of the samples, and the ranges of varied factors are described. The scientific and practical significance of the work is substantiated.

Введение

Месторождения полезных ископаемых на Севере отрабатываются в условиях, где горные породы большую часть года находятся в мёрзлом состоянии. Подготовка таких пород

к выемке практически повсеместно ведётся буровзрывным способом: он обеспечивает необходимую степень дробления и позволяет вовлечь в отработку крепкие и трещиноватые разности [1, 2]. Вскрышные породы на Кангаласском буроугольном месторождении разрабатываются шагающим экскаватором, который благодаря большой длине стрелы и значительной ёмкости ковша позволяет перемещать большие объёмы горной массы. Однако после взрыва горная масса не остаётся неизменной. Под действием отрицательных температур, влаги, содержащейся в породе и поступающей извне, и времени раздробленный массив постепенно смерзается - отдельные куски цементируются льдом, а развал превращается в связанную систему, прочностные характеристики которой заметно отличаются от исходных [3].

На практике это означает, что технологические решения, принятые для свежеотбитой массы, перестают работать уже через несколько суток. Шагающий экскаватор, рассчитанный на определённые условия черпания, начинает испытывать повышенное сопротивление внедрению ковша: смерзание повышает сопротивление резанию, увеличивает энергозатраты, ускоряет износ рабочего органа, вызывает намерзание и залипание породы на ковше. Экскавация замедляется, растёт число отказов и простоев, увеличивается себестоимость вскрышных работ. Чем длительнее период между взрывом и выемкой и чем ниже температура, тем острее проявляется эта проблема [4, 5].

При этом существующие исследования процесса резания мёрзлых пород в большинстве своём выполнены на однородных монолитных образцах или на искусственно приготовленных смесях с включениями, структура которых далека от интересующего нас реального взорванного массива [6, 7]. В результате закономерности резания именно вторично смерзшегося взорванного массива остаются неизученными, а технологические режимы выемки назначаются без должного обоснования.

Цель исследований – установить, как параметры состояния вторично смерзшегося взорванного массива и режимы резания влияют на сопротивление разрушению и удельную энергоёмкость процесса, и на этой основе обосновать рациональные технологические решения для выемки такой горной массы в условиях Севера.

Материалы и методы исследований

Смерзание взорванной горной массы – это не просто осложнение буровзрывной подготовки. Оно меняет саму природу объекта, с которым работает выемочное оборудование. После взрыва массив представляет собой совокупность отдельностей разного размера, между которыми распределены лёд, воздух и мелкие фракции. При отрицательных температурах влага, содержащаяся в породе и поступающая из атмосферы, постепенно цементирует эти отдельности, и развал превращается в связанную систему. Её поведение под нагрузкой уже не описывается ни законами для монолитной мёрзлой породы, ни закономерностями для талой раздробленной массы [8, 9].

На вскрышных работах, где применяются шагающие экскаваторы, это проявляется особенно остро. Их рабочий цикл построен на черпании раздробленной массы из развала, и эффективность этого процесса напрямую зависит от того, насколько легко ковш внедряется в породу и заполняется ею. Смерзание нарушает эту картину: ковш встречает повышенное сопротивление, хуже заполняется. В результате снижается производительность, растёт расход электроэнергии, увеличивается износ элементов ковша и тяговых канатов. Чем дольше развал находится без выемки, тем сильнее проявляются эти эффекты [9].

Возникает необходимость в лабораторном стенде, на котором можно воспроизвести структуру вторично смерзшегося взорванного массива, задавать и изменять температуру, влажность, крупность включений, плотность упаковки и время выдержки, а также регистрировать силовые и энергетические характеристики резания. Такой подход позволяет перейти от качественных наблюдений к количественным зависимостям, пригодным для проектирования технологии выемки.

Таким образом, возникает научная задача, имеющая как теоретическое, так и прикладное значение: установить закономерности процесса резания вторично смерзшихся взорванных пород и на этой основе обосновать рациональные технологические и конструктивные решения, обеспечивающие эффективную выемку такой горной массы в условиях Севера. Для её решения необходимо изучить структуру и физико-механические свойства вторично смерзшейся массы, выявить влияние степени и длительности смерзания на сопротивление резанию, установить зависимости энергоёмкости и производительности от температурно-влажностных и гранулометрических факторов, а также разработать методику расчёта и рекомендации по выбору режимов резания и параметров рабочего органа.

Объектом исследования является процесс резания вторично смерзшегося взорванного массива многолетнемёрзлых горных пород. В качестве модели такого массива используются искусственно сформированные и вторично смерзшиеся образцы прямоугольной формы, структурно сопоставимые с реальным развалом, образующимся после буровзрывной подготовки вскрышных пород в условиях криолитозоны.

Образцы изготавливаются искусственно, из разрушенной массы с заданным гранулометрическим составом, влажностью и плотностью упаковки, что позволяет воспроизвести структуру вторично смерзшегося взорванного массива (табл. 1).

Табл. 1. Состав образца

Компонент	Характеристика
Связующее (матрица)	Мелкозернистый песчаник
Включения (наполнитель)	Кубические элементы задаваемого размера, имитирующие отдельности взорванной породы
Влажность	10 %, 15 %, 20 % от массы сухого грунта
Плотность упаковки	1,6 г/см³ и 3,1 г/см³

Сам образец имеет прямоугольную форму в плане. Ширина образца – 350 мм, длина – 400 мм, высота – 175 мм. Такие размеры обеспечивают соблюдение условий подобия, размещение в рабочей зоне резания 8-10 включений средним размером до 40 мм, достаточную длину пути резания для выхода на установившийся режим и исключение краевых эффектов, что соответствует ГОСТ 12248.8-2020 и ГОСТ 12248-2010.

Эксперимент предполагает варьирование параметров состояния образца (смерзания). Варьируемые факторы представлены в таблице 2.

Табл. 2. Варьируемые факторы

Фактор	Обозначение	Уровни варьирования
Температура образца	T	−5°C; −10°C; −15°C; −20°C
Влажность	W	10%; 15%; 20%
Средний размер включений	d	20 мм; 30 мм; 40 мм

На основе обзора и анализа существующих стендов для определения усилий резания мёрзлых грунтов [10] для дальнейших исследований разработан режуще-испытательный стенд (рис. 1), предназначенный для изучения процесса резания одиночным резцом. За прототип принята лабораторная установка, созданная сотрудниками кафедр «Дорожные машины» и «Эксплуатация дорожных машин» (СибАДИ, г. Омск) [11].

Типовая схема подобных экспериментов включает подготовку образца, его установку на стенде, внедрение одиночного резца с заданными параметрами и регистрацию силовых характеристик. Например, С.А. Шемякин и Е.А. Шишкин использовали универсальный стенд, позволявший реализовать блокированную, глубокоблокированную и сотовую схемы резания мёрзлых осадочных пород [12, 13]. Сравнение показало, что сотовая схема требует меньших затрат энергии и предпочтительна для таких пород. Аналогичные стенды применялись для исследования резания глинистых и калийных образцов одиночным резцом.

В обзоре С.В. Панишева с соавторами справедливо отмечено, что полевые испытания не позволяют охватить весь спектр изменения свойств мёрзлых грунтов, поэтому лабораторные модели остаются основным инструментом [10]. Однако эти модели, будучи корректными для однородных образцов, не учитывают структуру взорванной массы. Прямых данных о том, как ведёт себя резец во вторично смерзшемся взорванном массиве, в литературе практически нет.

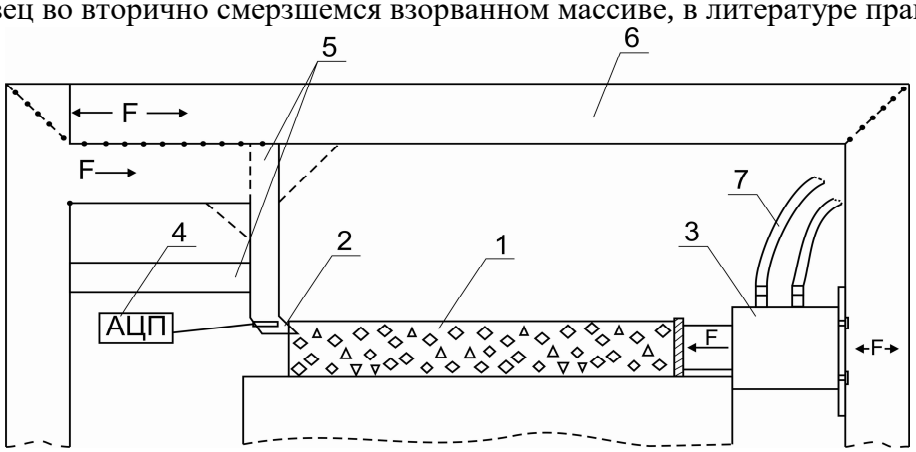


Рис. 1. Лабораторная установка для определения сопротивления резания мерзлых грунтов: 1 – металлическая кассета 400х350х175, наполненная грунтом; 2 – резец (ширина 20 мм, угол в плане 180°) на который наклеиваются тензодатчики для определения усилий; 3 – домкрат; 4 – приемник сигнала; 5 – балка; 6 – тавр; 7 – рукав высокого давления РВД

Предлагаемый методический подход отличается от известных по нескольким принципиальным позициям. Прежде всего, объектом исследования становится не монолитная мёрзлая порода, а искусственно сформированный и вторично смерзшийся образец, структура которого воспроизводит взорванный массив. Он готовится из разрушенной массы с заданным гранулометрическим составом, влажностью и плотностью упаковки [14]. Это позволяет работать именно с той структурой, которая формируется после буровзрывной подготовки.

Далее, варьируются не только режимы резания, но и параметры смерзания. Температура, влажность, крупность включений, плотность упаковки и время выдержки становятся управляемыми факторами наряду с глубиной и скоростью резания. Это даёт возможность устанавливать зависимости сопротивления резанию не только от того, как действует резец, но и от того, в каком состоянии находится массив.

Кроме того, учитывается фактор времени. Образцы выдерживаются в условиях, имитирующих период между взрывом и выемкой, что позволяет оценить динамику роста сопротивления резанию по мере увеличения прочности ледяных связей.

Таким образом, предлагаемый методический подход не дублирует известные подходы, а восполняет пробел, связанный с отсутствием экспериментальных данных о резании именно вторично смерзшегося взорванного массива. Она позволяет перейти от качественных представлений о «затруднённости» выемки к количественным закономерностям, необходимым для обоснованного проектирования технологии добычи в условиях криолитозоны.

Выводы

Научная и практическая значимость работы заключается в том, что до настоящего времени процесс резания вторично смерзшегося взорванного массива оставался вне экспериментального изучения. Работы по резанию мёрзлых пород выполнялись на однородных образцах, структура которых не соответствует раздробленной и неравномерно сцементированной горной массе. Поэтому многие вопросы, такие как: какие факторы и в какой степени определяют сопротивление разрушению, как меняется энергоёмкость процесса по мере увеличения прочности ледяных связей – оставались без количественных ответов.

Настоящая работа восполняет этот пробел. Впервые объектом исследования становится искусственно сформированный и вторично смерзшийся образец, структура которого

воспроизводит взорванный массив. Это позволяет перейти от качественных представлений к экспериментально обоснованным зависимостям. В научном плане это даёт несколько результатов. Во-первых, устанавливаются количественные связи между сопротивлением резанию, удельной энергоёмкостью и параметрами состояния массива – температурой, влажностью, крупностью включений, плотностью упаковки, временем смерзания. Во-вторых, выявляется механизм разрушения вторично смерзшейся горной массы, который отличается от механизма разрушения монолитной мёрзлой породы: разрушение идёт не по однородному материалу, а по сложной системе «минеральный скелет – лёд – пустоты – трещины». В-третьих, обосновываются критерии оценки эффективности резания применительно к условиям криолитозоны и разрабатываются регрессионные и номографические модели, пригодные для инженерных расчётов. Эти результаты расширяют представления о физике взаимодействия рабочего органа с мёрзлой раздробленной средой и создают методическую основу для дальнейших исследований.

Практическая ценность работы связана с тем, что её результаты непосредственно ориентированы на повышение эффективности добычных работ на северных месторождениях. Смерзание взорванной горной массы приводит к росту усилий резания, увеличению энергозатрат, снижению производительности выемочного оборудования, повышенному износу рабочего органа и, как следствие, к росту себестоимости полезного ископаемого.

Результаты исследования могут быть использованы проектными и горнодобывающими организациями при разработке технологических схем ведения выемочных работ в условиях криолитозоны, корректном выборе экскаваторов. Кроме того, они найдут применение в учебном процессе при подготовке специалистов горного профиля.

Благодарности и финансирование: Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № FWRS-2026-0052, регистрационный номер в ЕГИСУ НИОКТР 126021217278-1) с использованием приборной базы ЦКП ФИЦ ЯНЦ СО РАН.

Список литературы

1. Бондаренко И.Ф, Жариков С.Н., Зырянов И.В., Шеменёв В.Г. Буровзрывные работы на кимберлитовых карьерах Якутии. – Екатеринбург: ИГД УрО РАН, 2017. – 172 с.
2. Галимьянов Ал.А., Мишнев В.И. Методический подход к совершенствованию буровзрывных работ в условиях криолитозоны на примере Эльгинского каменноугольного месторождения // Уголь. – 2025. – №7. – С.116-118. – DOI: 10.18796/0041-5790-2025-7-116-118.
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. 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. – DOI:10.17580/gzh.2022.07.13.
5. Панишев С.В., Ермаков С.А., Алькова Е.Л., Максимов М.С. Особенности разработки смерзающихся вскрышных пород драглайном в условиях пластового месторождения криолитозоны // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2013. – №S4. – С. 38-48.
6. Васильев С.И. Методика экспериментальных исследований процесса резания сезонно-мерзлых грунтов с квлючениями // Системы. Методы. Технологии. – 2011. – №12. – С. 146-151.
7. Баловнев В.И., Данилов Р.Г., Андрюхов Н.М. Стенд для исследования процессов взаимодействия со средой рабочих органов дорожно-строительных машин // Строительные и дорожные машины. – 2020. – №12. – С. 3-8.
8. Панишев С.В, Алькова Е.Л., Максимов М.С. К оценке показателя трудности экскавации смерзающегося взорванного массива горных пород // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2019. – №3. – С. 31-36. – DOI: 10.15372/FTPRPI20190304.
9. Панишев С.В., Каймонов М.В., Козлов Д.С., Максимов М.С. Рекомендации по отработке драглайном взорванного многолетнемерзлого массива // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2014. – №10. – С. 66-71.
10. Панишев С.В., Алькова Е.Л., Максимов М.С., Хосоев Д.В. Анализ методик и конструкций стендов для исследования процесса резания пород различными типами рабочих органов горного оборудования // Горная промышленность. – 2023. – №6. – С. 103-108. – DOI: 10.30686/1609-9192-2023-6-103-108.
11. Сачук А.Ю. Обоснование выбора технологических параметров рыхлителя статического действия при разработке мерзлых грунтов: Дисс. … канд. техн. наук. – Омск, 2007. – 186 с.

12. Шемякин С.А., Шишкин Е.А. Определение касательной составляющей сопротивления резанию мерзлых осадочных пород по блокированной, глубокоблокированной и сотовой схемам // Записки Горного института. – 2025. – Т. 272, № 2. – С. 136-144.
13. Шемякин С.А. Разрушение мерзлых мелкозернистых и крупнообломочных пород резанием (рыхлением). – Хабаровск: Изд-во Приамурского географического общества, 2003. – 143 с.
14. 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.

References

1. Bondarenko I.F., Zharikov S.N., Zyryanov I.V., Shemenev V.G. Drilling and Blasting Operations at Yakutia's Kimberlite Open-Pit Mines. – Yekaterinburg: IM UB RAS, 2017. – 172 p.
2. Galimyanov Al.A., Mishnev V.I. Methodological approach to improving drilling and blasting operations in cryolithozone conditions: a case study of the Elga coal deposit // Coal. 2025, no. 7, pp. 116-118. DOI: 10.18796/0041-5790-2025-7-116-118.
3. Kilin Yu.A., Konstantinov A.V. Increasing the productivity of walking draglines: a case study of the "Nazarovsky" open-pit mine // Mining Informational and Analytical Bulletin. 2016, no. 2, pp. 36-42.
4. Pechenkin V.G., Pechenkina A.V., Eremeeva O.S. Impact of climatic conditions on the productivity of walking draglines and bulldozers during overburden removal at alluvial gold deposits // Mining Journal. 2022, no. 7, pp. 77-81. DOI:10.17580/gzh.2022.07.13.
5. Panishev S.V., Ermakov S.A., Alkova E.L., Maksimov M.S. Specifics of excavating frost-bound overburden with a dragline at a bedded deposit in the cryolithozone // Mining Informational and Analytical Bulletin. 2013, no. S4, pp. 38-48.
6. Vasiliev S.I. Methodology for experimental studies of the cutting process for seasonally frozen soils with inclusions // Systems. Methods. Technologies. 2011, no. 12, pp. 146-151.
7. Balovnev V.I., Danilov R.G., Andryukhov N.M. Test rig for investigating the interaction processes between road construction machinery working tools and the medium // Construction and Road Machinery. 2020, no. 12, pp. 3-8.
8. Panishev S.V., Alkova E.L., Maksimov M.S. On the assessment of the excavation difficulty index for a blasted rock mass prone to freezing // Journal of Mining Science. 2019, no. 3, pp. 31-36. DOI: 10.15372/FTPRPI20190304.
9. Panishev S.V., Kaimonov M.V., Kozlov D.S., Maksimov M.S. Recommendations for dragline mining of a blasted permafrost rock mass // Mining Informational and Analytical Bulletin. 2014, no. 10, pp. 66–71.
10. Panishev S.V., Alkova E.L., Maksimov M.S., Khosoev D.V. Analysis of methodologies and test rig designs for investigating rock cutting processes using various types of mining equipment working tools // Russian Mining Industry. 2023, no. 6, pp. 103-108. DOI: 10.30686/1609-9192-2023-6-103-108.
11. Sachuk A.Yu. Justification of the selection of technological parameters for a static-action ripper during the excavation of frozen soils: Diss. … cand. of tech. sc. – Omsk, 2007. – 186 p.
12. Shemyakin S.A., Shishkin E.A. Determination of the tangential component of cutting resistance for frozen sedimentary rocks using blocked, deeply blocked, and cellular schemes // Journal of Mining Institute. 2025, vol. 272, no. 2, pp. 136-144.
13. Shemyakin, S. A. Fragmentation of frozen fine-grained and coarse-fragmental rocks by cutting (ripping). – Khabarovsk: Priamurye Geographical Society Publishing House, 2003. – 143 p.
14. Patent No. 2629610 RU. Method for producing 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, Bull. No. 25.

Сведения об авторах:	*Information about authors:*
Алькова Елена Леонидовна – кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории открытых горных работ	**Alkova Elena Leonidovna** – candidate of technical sciences, senior research of the open-pit mining laboratory
Федоров Илья Васильевич – инженер лаборатории открытых горных работ	**Fedorov Ilya Vasilievich** – engineer of the open-pit mining laboratory
Nelealc12@rambler.ru	

Получена 08.10.2026