

На правах рукописи



Максимов Михаил Саввич

**ОБОСНОВАНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ И РАЦИОНАЛЬНЫХ
ПАРАМЕТРОВ ЭКСКАВАЦИИ ДРАГЛАЙНОМ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ
ГОРНЫХ ПОРОД, СКЛОННЫХ К ПОВТОРНОМУ СМЕРЗАНИЮ
(на примере разреза «Кангаласский»)**

Специальность 2.8.8. «Геотехнология, горные машины»

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Якутск – 2024

Работа выполнена в Институте горного дела Севера им. Н.В. Черского Сибирского отделения Российской академии наук – обособленном подразделении Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Якутский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук» (ИГДС СО РАН)

Научный руководитель: **Панишев Сергей Викторович**, кандидат технических наук, ИГДС СО РАН, ведущий научный сотрудник лаборатории открытых горных работ

Официальные оппоненты: **Косолапов Александр Иннокентьевич**, доктор технических наук, профессор, ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет», профессор кафедры «Открытые горные работы» Института цветных металлов

Резник Александр Владиславович, кандидат технических наук, ФГБУН Институт горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН, старший научный сотрудник лаборатории открытых горных работ

Ведущая организация ФГБОУ ВО «Забайкальский государственный университет»

Защита диссертации состоится 6 июня 2024 г. в 10:00 часов на заседании диссертационного совета 24.1.234.01 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Якутский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук» по адресу: 677980, Республика Саха (Якутия), г. Якутск, пр. Ленина 43. Тел/факс 8(4112)335930. E-mail: igds@ysn.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ЯНЦ СО РАН <https://prez.ysn.ru/>.

Автореферат разослан «___» _____ 2024 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета,
канд. техн. наук



Зубков Владимир Петрович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Республика Саха (Якутия) – важнейший горнодобывающий регион Российской Федерации, где ведется разработка месторождений полезных ископаемых в суровых природно-климатических условиях в зоне многолетней мерзлоты. Для таких месторождений характерна отрицательная температура горных пород, предопределяющая их повышенную прочность и необходимость предварительного буровзрывного рыхления. При этом процесс экскавации осложняется повторным смерзанием взорванной горной массы, особенно, в весенне-летний период, что существенно снижает производительность экскаватора вплоть до полной его остановки по причине невозможности черпания горной массы. В научной литературе вопросам, касающимся совершенствования бестранспортной разработки пластовых месторождений в части повышения производительности драглайнов уделено достаточно много внимания, но, в большинстве случаев, это касается условий разработки месторождений умеренных широт, а не зоны распространения многолетней мерзлоты. При экскавации же взорванных многолетнемерзлых горных пород (ММГП), склонных к повторному смерзанию, температурный режим развала и окружающей среды, от которых зависит прочность смерзания горной массы, не одинаков в различные периоды года, что, в конечном счете, сказывается на работе экскаватора при производстве вскрышных работ. Таким образом, обоснование производительности драглайна и рациональных параметров экскавации смерзающихся взорванных горных пород с учетом изменения их температуры и влажности в разные периоды года (весна-лето; осень-зима) в условиях разработки месторождений криолитозоны является актуальной задачей, имеющей важное научное и практическое значение.

Степень разработанности темы. Изучением вопроса совершенствования бестранспортной разработки пластовых месторождений в части повышения производительности драглайнов занимались К.В. Сташко, К.А. Стариков, В. Erdem, P. Rai, N. Demirel, В.Г. Проноза, И.А. Леоненко, С.В. Панишев и др.

Для бестранспортной системы разработки месторождений основные направления исследований связаны с совершенствованием существующих и разработкой новых технологических схем, оптимизацией параметров, как драглайна, так и взрывных работ, увеличением высоты вскрышных уступов, модернизацией конструкции, механизмов и рабочего органа драглайна, а также автоматизацией технологического процесса экскавации. Однако большинство этих исследований проводились и проводятся применительно к месторождениям, расположенным вне зоны многолетней мерзлоты и конкретным данным по обоснованию рациональных параметров экскавации взорванного массива ММГП в литературе не известно. Из последних работ можно отметить способ разработки, предложенный Панишевым С.В. для бестранспортной технологии вскрышных работ. Этот способ, включающий ограничение длины экскаваторного блока и специальную организацию работ, заключающуюся в перемещении пород предотвала в конечный контур отвала сразу после окончания работ на первой

заходке, позволяет снизить влияние повторного смерзания взорванной горной массы на работу драглайна.

Первые теоретические и экспериментальные исследования процесса смерзания горных пород были проведены советскими учеными Н.А. Цытовичем и И.С. Волождиной. Последователями и продолжателями изучения этого вопроса были М.Н. Гольдштейн, А. А. Пчелинцев, А.В. Садовский, С.С. Вялов, Л.Т. Роман, М.Н. Царапов, С.С. Волохов и др. При обзоре современного состояния вопроса не найдено работ, касающихся лабораторных и натурных исследований прочности повторного смерзания горной массы в зависимости от температуры, влажности, гранулометрического состава и плотности упаковки горной массы, что, в конечном счете, оказывает влияние на производительность драглайна при экскавации взорванных смерзающихся горных пород месторождений криолитозоны.

Исследования по теме проводились в рамках этапов плановых НИР ИГДС СО РАН: проект VII.60.4.2. «Разработка основ новых геотехнологий эффективного освоения месторождений кластерного строения в условиях криолитозоны» (№ гос. рег. 01201050749, 2008-2012 гг.); проект «Исследование и разработка эффективных конструктивных и технологических параметров подземной и открытой геотехнологии, методов освоения недр криолитозоны» (№0382-2016-0001, 2013-2020 гг.); проект VIII.74.5.2. «Разработка и обоснование нетрадиционных, ресурсосберегающих элементов инновационных технологий и методов комплексного освоения месторождений твердых полезных ископаемых Севера» (№ гос. рег. 01201362424, 2014-2016 гг.); проект РФФИ «Экспериментальное и теоретическое исследование вторичного смерзания взорванных горных пород на карьерах Севера» (№ 12-05-98503-р_восток_a, 2012-2014 гг.).

Объект исследования: бестранспортная разработка пластовых месторождений криолитозоны.

Предмет исследования: производительность драглайна и параметры экскавации смерзающейся взорванной горной массы месторождений криолитозоны.

Идея работы заключается в учете температурного режима и характера изменения гранулометрического состава породы в забое при обосновании (прогнозе) производительности драглайна и рациональных параметров экскавации взорванных ММГП, склонных к повторному смерзанию в различные периоды года.

Цель работы: Обоснование производительности драглайна и рациональных параметров экскавации взорванных ММГП, позволяющих снизить негативное влияние процесса их повторного смерзания на эффективность бестранспортной системы разработки.

Основные задачи исследований:

- провести анализ современного состояния вопроса процесса смерзания горных пород, его влияния на технологию и параметры бестранспортной системы разработки;

- исследовать особенности формирования температурного режима породы в забое драглайна при экскавации взорванной смерзающейся горной массы в разные периоды года и обосновать зависимость производительности драглайна от температуры пород в забое в течение календарного года;

- исследовать гранулометрический состав пород в развале и забое драглайна в зависимости от температурного режима пород и установить его влияние на производительность экскаватора в течение календарного года;

- исследовать влияние параметров забоя и технологической схемы отработки блока на производительность драглайна в условиях повторного смерзания взорванной горной массы;

- разработать специализированный стенд и провести исследования прочности смерзшихся вскрышных пород на срез на образцах, структурно сопоставимых с взорванным массивом горных пород, для оценки показателя трудности их экскавации и обосновать условия эффективного применения бестранспортной технологии при открытой разработке месторождений криолитозоны.

- разработать рекомендации по рациональным параметрам и технологии ведения вскрышных работ в разные периоды года (весна-лето, осень-зима), обеспечивающих снижение негативного влияния процесса повторного смерзания взорванной горной массы на эффективность бестранспортной технологии при открытой разработке месторождений криолитозоны.

Методы исследований: анализ и обобщение литературных источников по теме исследований, натурные и лабораторные исследования, математическое моделирование, статистическая обработка результатов исследований.

Положения, выносимые на защиту:

1. Обоснование производительности и выбор параметров экскавации, обеспечивающих эффективную выемку смерзающейся взорванной горной массы в условиях открытой разработки месторождений криолитозоны, необходимо производить с учетом изменения температуры и влажности горной массы в экскаваторном забое и массиве ММГП, гранулометрического состава породы в забое, а также схемы отработки блока и параметров забоя в разные периоды производства горных работ (весна-лето, осень-зима).

2. Методика оценки показателя трудности экскавации, учитывающая изменение прочности смерзшихся вскрышных пород на срез на образцах, структурно сопоставимых с взорванным массивом горных пород, в зависимости от его температуры, влажности, гранулометрического состава и плотности упаковки, позволяющая обосновать условия эффективного применения бестранспортной технологии при разработке взорванных ММГП, склонных к повторному смерзанию.

Научная новизна работы заключается в следующем:

- установлены особенности формирования температурного режима в развале взорванных ММГП в разные периоды года (весна-лето, осень-зима). Показано, что в весенне-летний период температура поверхностного слоя отбитых кусков навала зависит от хладозапаса, накопленного в зимний период и величины солнечной инсоляции, а в осенне-зимний период – от тепловой

инерции массива, разогретого летом и воздействия низких температур окружающего воздуха;

- впервые выявлена зависимость производительности драглайна от температурного режима породы в забое и размера среднего куска при последовательном обнажении забоя в условиях повторно смерзающихся взорванных пород на месторождениях криолитозоны. Экспериментально установлено, что гранулометрический состав взорванных ММГП имеет непосредственную связь с их температурой в массиве.

- предложена эффективная технология экскавации драглайном взорванного массива ММГП с послойным снятием растепленного слоя породы по длине экскаваторного блока, обоснованная результатами моделирования температурных полей, показывающими упорядоченный характер послойного распространения температуры по всей длине взорванного блока;

- экспериментально установлено, что прочность на срез образцов, структурно сопоставимых с взорванным массивом ММГП, растет с понижением температуры, а также с увеличением влажности и плотности упаковки. Гранулометрический состав при минимальных значениях влажности (10%) и температуры (-5°C) не оказывает существенного влияния на прочность на срез, а при максимальных значениях температуры (-15°C) и влажности (15%) прочность на срез снижается в зависимости от увеличения размера включений.

Достоверность полученных автором результатов подтверждается компьютерным и физическим моделированием, большим объемом экспериментальных и натуральных измерений, полученных с применением разработанной методики исследований, сходимостью результатов экспериментальных и натуральных исследований, относительное расхождение которых не превышает 10-15%.

Практическая значимость работы заключается в обосновании производительности драглайна и рациональных параметров экскавации взорванных смерзающихся вскрышных пород в условиях месторождений криолитозоны в различные периоды года, а также разработке методики оценки показателя трудности экскавации, что позволило обосновать область эффективного использования шагающего экскаватора для условий эксплуатации Кангаласского месторождения угля.

Реализация результатов работы. «Рекомендации по выбору и обоснованию рациональных технологических параметров разработки массива взорванных вскрышных пород, склонных к повторному смерзанию» переданы для использования на разрезе «Кангаласский» филиал АО ХК «Якутуголь».

Полученные результаты могут быть использованы при проектировании горнодобывающих предприятий, открытой разработке пластовых месторождений в зоне многолетней мерзлоты с использованием бестранспортной технологии, а также в учебном процессе по специальности «Открытые горные работы».

Личный вклад автора. Представленные в диссертационной работе лабораторные и натурные результаты выполнены с участием автора. Автор принимал непосредственное участие на всех этапах исследований по постановке задач, разработке и созданию оригинального стенда, разработке методики прочно-

сти образцов смерзшихся вскрышных пород на срез, обработке и анализе полученных результатов натуральных и лабораторных исследований, разработке предложений (рекомендаций) по снижению влияния процесса повторного смерзания ММГП на эффективность бестранспортной технологии

Апробация: Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на семинарах и ученом совете ИГДС СО РАН, научно-практических конференциях молодых ученых и специалистов ИГДС СО РАН «Проблемы горной науки: взгляд молодых ученых» (Якутск, 2012, 2014), научно-технической конференции «Современные проблемы теплофизики и теплоэнергетики в условиях Крайнего Севера» (Якутск, 2017), Всероссийских научно-практических конференциях «Геомеханические и геотехнологические проблемы эффективного освоения месторождений твердых полезных ископаемых северных и северо-восточных регионов России» (Якутск, 2019, 2021), Всероссийской научной конференции с международным участием «Научно-технические проблемы и технологии освоения месторождений полезных ископаемых в сложных горно-геологических условиях и на больших глубинах горных работ» (Новосибирск, 2022).

Публикации: Основные положения и результаты диссертационной работы отражены в 18 печатных работах, из них 11 статей в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России, 2 статьи входят в международную базу данных Scopus. Получено 2 патента РФ на изобретения. В прочих научных изданиях – 3.

Объем и структура диссертации: Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы из 152 наименований и 4 приложений, содержит 125 страниц машинописного текста, в том числе 32 рисунка, 19 таблиц.

Автор выражает глубокую благодарность научному руководителю к.т.н. Панишеву С.В., д.т.н. Ткачу С.М., к.т.н. Зубкову В.П., к.т.н. Буракову А.М., к.т.н. Каймонову М.В. за полезные замечания и консультации, а также всему коллективу лаборатории открытых горных работ ИГДС СО РАН.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение содержит обоснование актуальности темы диссертационной работы, цель, идею работы, задачи исследований, защищаемые положения, научную новизну, практическую значимость.

В **первой главе** проведен анализ современного представления о процессе смерзания горных пород, его влиянии на технологию и параметры бестранспортной системы разработки. Сформулированы идея, цель и задачи исследований.

Во **второй главе** изложены результаты натуральных исследований температурного режима массива ММГП, а также поверхностного слоя породы в экскаваторном забое. Приведена методика натуральных исследований и показано влияние температуры породы в забое на производительность драглайна на месторождениях криолитозоны. Представлена методика натуральных исследований гранулометрического состава взорванных ММГП в развале и в забое драглайна. По результа-

там проведенных исследований установлен характер изменчивости гранулометрического состава пород в забое драглайна в зависимости от температурного режима пород и его влияние на производительность экскаватора. Установлено влияние схемы отработки блока и параметров экскаваторного забоя на производительность драглайна.

В третьей главе приводится методика оценки трудности экскавации взорванных горных пород, склонных к повторному смерзанию, включающая исследования прочности смерзшихся вскрышных пород на срез на образцах, структурно сопоставимых с взорванным массивом горных пород на специализированном стенде. С использованием разработанной методики определена область эффективного применения шагающего экскаватора для условий разработки угольного месторождения Кангаласское.

В четвертой главе приведены рекомендуемые параметры экскавации для разреза Кангаласский (высота уступа, ширина заходки, производительность в зависимости от температуры породы), представлены рекомендации по снижению влияния процесса повторного смерзания взорванных ММГП на эффективность бестранспортной технологии на месторождениях криолитозоны.

НАУЧНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ, ВЫНОСИМЫЕ НА ЗАЩИТУ

1. Обоснование производительности и выбор параметров экскавации, обеспечивающих эффективную выемку смерзающейся взорванной горной массы в условиях открытой разработки месторождений криолитозоны, необходимо производить с учетом изменения температуры и влажности горной массы в экскаваторном забое и массиве ММГП, гранулометрического состава породы в забое, а также схемы отработки блока и параметров забоя в разные периоды производства горных работ (весна-лето, осень-зима).

Для месторождений криолитозоны, к которым относится и Кангаласское, характерна совокупность сложных природно-климатических условий, среди которых следует выделить наличие многолетней мерзлоты, склонность пород к смерзанию после взрывного рыхления и низкие отрицательные температуры воздуха. Эти факторы оказывают решающее влияние на производительность экскаватора-драглайна, которая зависит от физико-механических свойств взорванной горной массы, качества дробления пород взрывом и определяется продолжительностью рабочего цикла ($t_{ц}$).

При расчете продолжительности рабочего цикла драглайна обычно не учитываются особенности взорванного развала ММГП, где формируются температурные поля, определяющие зоны смерзания. Процесс формирования температурного режима в развале является сложным и определяется многими факторами, такими, как теплофизические характеристики пород, фазовые переходы влаги, температура атмосферного воздуха, температура, влажность и плотность пород, мощность вскрышных пород, углы формируемых откосов, качество взрывной подготовки. Причиной смерзания в большинстве случаев является образование слоя оттайки на поверхности куска породы, что в условиях отрицательной темпе-

ратуры массива в целом приводит к смерзанию кусков друг с другом. Это увеличивает продолжительность рабочего цикла за счет многократного холостого черпания (плохого наполнения ковша) при экскавации смерзшейся горной массы, когда драглайн в силу своих конструктивных особенностей не может внедрить ковш во взорванный массив.

Для оценки влияния температурного режима в развале горных пород на производительность драглайна на разрезе Кангаласский были выполнены натурные исследования температурного режима породы в забое экскаватора, фото и видеосъемка процесса экскавации породы, хронометраж рабочего процесса драглайна. С помощью видеосъемки фиксировался процесс экскавации драглайна ЭШ-10/70 и определяли его полную продолжительность рабочего цикла и наполнение ковша драглайна. Одновременно после видеосъемки процесса экскавации проводился замер температуры поверхности забоя драглайна. Замеры температуры осуществлялись с помощью инфракрасного термометра (пирометра), а также посредством тепловизионной съемки с использованием оборудования ЦКП ФИЦ ЯНЦ СО РАН тепловизора FLIR SC 660.

В первом случае, измерение температуры пирометром поверхности забоя выполнялось сразу после остановки экскаватора, а во втором – непосредственно в процессе экскавации взорванной горной массы. В каждом случае фиксировались температура и влажность воздуха, а также производился забор образцов для установления влажности горных пород. Подробное описание методики проведения натурных исследований приведено в диссертации.

Выполненные натурные исследования позволили установить характер изменения температурного режима в развале взорванных ММГП в разные периоды года (весна-лето, осень-зима) при последовательном обнажении забоя (рисунок 1).

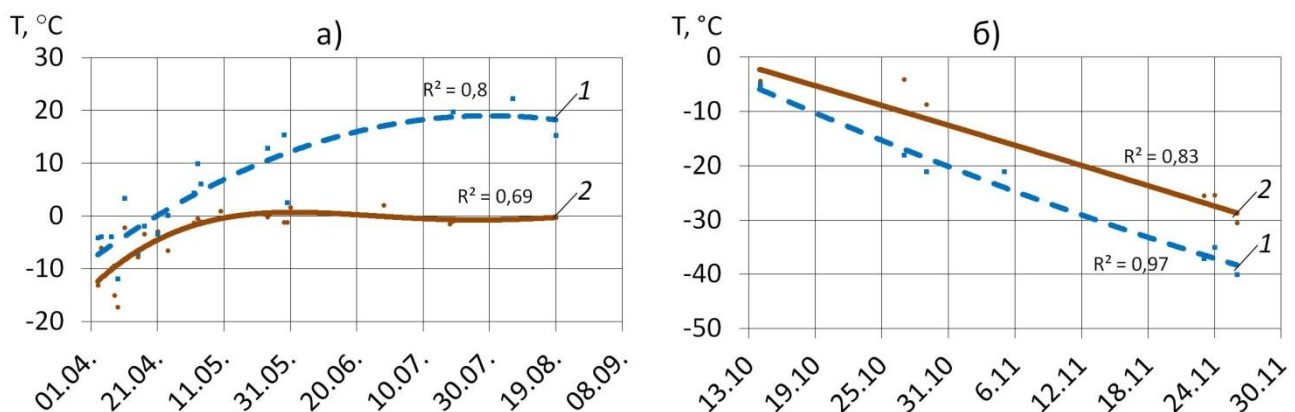


Рисунок 1 – Температура поверхности породного навала в забое в разные периоды года (а) – весна-лето, б) – осень-зима: 1 – температура воздуха, 2 – температура пород в забое

Было установлено, что в весенне-летний период температура поверхностного слоя навала определяется хладозапасом массива, накопленным в зимний период, а также величиной солнечной инсоляции, которая способствует интенсивной конденсации влаги на поверхности мерзлых кусков породы, создавая условия для их повторного смерзания.

В осенне-зимний период температура в поверхностном слое формируется за счет теплового запаса массива, накопленного летом, и воздействия низких температур окружающего воздуха. При этом, отрицательная температура поверхностного слоя развала в условиях его обнажения хотя и выше температуры окружающего воздуха, но совпадает с ней по знаку, что практически исключает конденсацию влаги, вследствие чего замедляется процесс повторного смерзания взорванного массива. Таким образом, в разные периоды года во взорванном массиве ММГП происходят процессы промерзания и протаивания, обуславливающие интенсивность смерзания горных пород и, соответственно, эффективность их экскавации.

На рисунке 2 показаны данные времени рабочего цикла драглайна ЭШ-10/70 в зависимости от температуры породы в забое, которые являются средними значениями за один хронометражный период, равный 20-30 мин. Зеленым цветом на графике выделен диапазон средней продолжительности рабочего цикла драглайна, обеспечивающий его паспортную производительность.

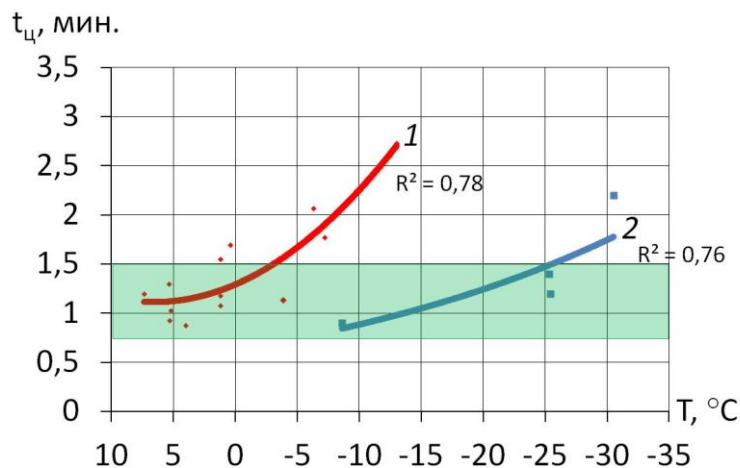


Рисунок 2 – Изменение продолжительности времени цикла драглайна от температуры поверхностного слоя породы в забое в различные периоды года: 1 – весна-лето, 2 – осень-зима

По результатам наблюдений, в весенне-летний период фактическое время цикла драглайна с понижением температуры поверхностного слоя пород забоя увеличивается в среднем в несколько (до 3,5) раз и, соответственно, резко снижается его производительность. При этом, стабилизация времени рабочего цикла, как было установлено наблюдениями, происходит при достижении температуры породы в забое от 5°C и выше. В осенне-зимний период замедление продолжительности времени цикла экскавации драглайна происходит более монотонно, так как при отрицательной температуре породы и воздуха конденсация влаги на породных кусках сводится к минимуму.

В связи с этим, для расчетов продолжительности времени цикла драглайна в оба периода года были выведены эмпирические формулы:

$$\text{Весна-лето: } t_{ц} = e^{0,34-0,044T_{п}+9,58 \cdot 10^{-4}T_{п}^2}, \text{ мин.}$$

$$\text{Осень-зима: } t_{ц} = 0,63e^{-0,03T_{п}}, \text{ мин,}$$

где $T_{п}$ – температура пород в забое, °C.

Таким образом, продолжительность рабочего цикла драглайна при экскавации смерзающейся взорванной массы в условиях месторождений криолитозоны является нелинейной параметрической функцией, отражающей его зависимость от температуры породы в забое экскаватора. Наличие отрицательной температуры в забое драглайна приводит к существенному снижению производительности (снижению эффективности экскавации), вплоть до полной остановки экскаватора.

Известно, что гранулометрический состав (кусковатость) взорванной горной массы оказывает существенное влияние на производительность экскаватора. Наличие негабарита в большом количестве приводит к увеличению продолжительности рабочего цикла драглайна, а переизмельчение взорванной горной массы склонной к повторному смерзанию за счет увеличения плотности упаковки кусков породы, способствует увеличению прочности смерзания, что также, ведет к снижению производительности экскаватора-драглайна. Для оценки влияния гранулометрического состава взорванной горной массы на производительность драглайна на разрезе Кангаласский были выполнены натурные исследования.

Исследование кусковатости взорванного массива ММГП в развале и забое драглайна проводилось планиметрическим методом по разработанной методике, которая подробно описана в диссертационной работе. В таблице 1 представлены характерные результаты определения кусковатости взорванного массива в развале в разные месяцы в течение календарного года.

Таблица 1 – Результаты измерений кусковатости взорванного массива многолетнемерзлых пород по трем взрывам в течение календарного года.

Месяц взрыва	Средняя температура массива породы, °С	Процентное содержание гранулометрического состава пород по размерам фракций, (мм)						
		0-100	101-200	201-300	301-400	401-500	501-800	>800
Май	- 2,1	8,9	20,4	17,4	10,6	9,6	30,8	2,2
Июнь	- 1,1	5,1	20,8	17,2	20,5	14,6	18,6	3,1
Июль	1,2	5,9	22,5	28,3	22,1	11,3	9,8	0

Установлено, что в различные температурно-климатические периоды гранулометрический состав взорванных ММГП неодинаков, что связано с их температурным состоянием в массиве. Температура в массиве взрываемого блока находится в интервале, где происходят основные фазовые переходы влаги, обуславливающие благоприятные условия для процесса смерзания. Показано, что при повышении средней температуры породы в массиве от $-2,1^{\circ}\text{C}$ до $+1,2^{\circ}\text{C}$ доля крупных фракций >500 мм существенно снижается (до 3 раз), а доля фракций 201-300 мм возрастает в 1,5-2 раза. При этом содержание фракций 101-200 мм существенно не изменяется. Так, доля крупных фракций >500 мм при взрывании с одинаковыми параметрами БВР в мае (температура в массиве $-2,1^{\circ}\text{C}$) составила 30%, в июне ($-1,1^{\circ}\text{C}$) – около 20% и в июле ($+1,2^{\circ}\text{C}$) – 10%, а доля фракций 201-300 мм увеличилась с 17% до 28%.

Натурными наблюдениями установлен характер изменения гранулометрического состава кусков в рабочей зоне драглайна при обработке взорванного многолетнемерзлого массива в весенне-летний период и его зависимость от температуры породы в забое (рисунок 3).

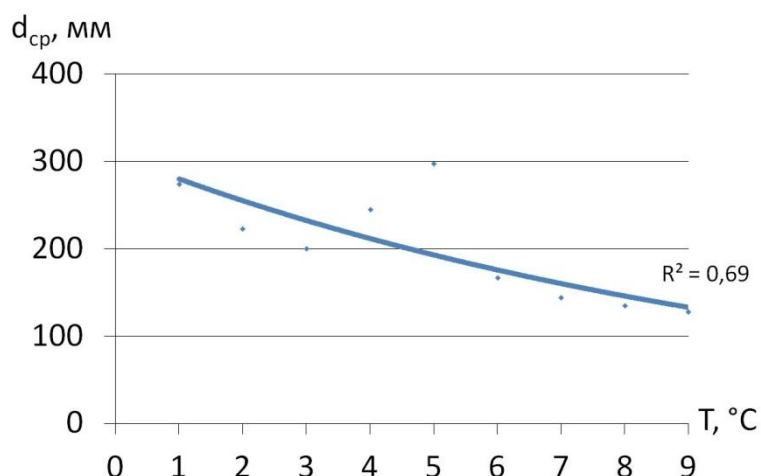


Рисунок 3 – Изменение размера среднего куска в рабочей зоне драглайна от температуры пород в забое

Отмечено уменьшение размера среднего куска ($d_{ср}$) в 2 раза при повышении средней температуры пород (май-июль) от 1°С до 9°С, при этом доля крупных фракций (501-800 мм) уменьшается примерно 3 раза, а мелких (101-200 мм) возрастает в 1,3 раза.

Натурными исследованиями впервые установлены зависимости производительности драглайна от температурного режима породы в забое и размера среднего куска при последовательном обнажении забоя в условиях повторно смерзающихся взорванных пород на месторождениях криолитозоны (рисунок 4).

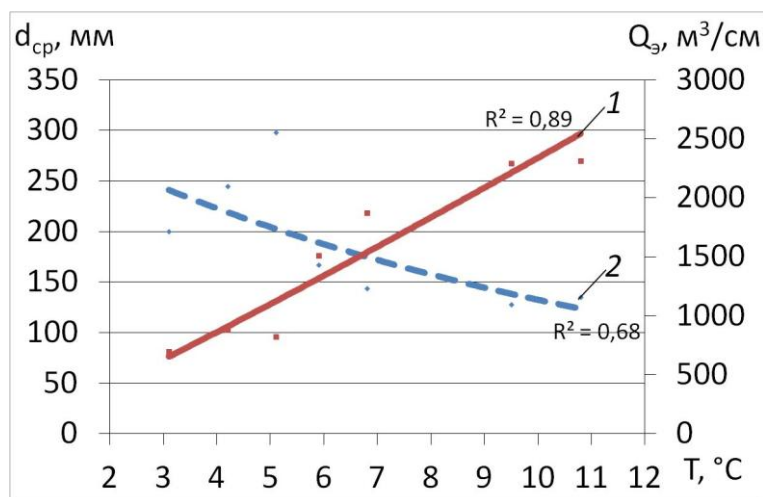


Рисунок 4 – Зависимость производительности драглайна от размера среднего куска и температуры пород в забое: 1 – производительность, 2 – размер среднего куска

Исходя из установленной зависимости следует, что с повышением температуры поверхностного слоя и уменьшением размера среднего куска от 300 до 100 мм производительность драглайна увеличивается с 500 до 2500 м³/смену. При достижении температуры поверхностного слоя 5÷7°С наблюдается устойчивый разбор забоя с производительностью драглайна более 1000 м³/смену.

Для обоснования рациональных параметров экскавации смерзающейся взорванной горной массы в условиях открытой разработки месторождений

криолитозоны, по разработанной в ИГДС СО РАН программе, выполнены расчеты температурного режима во вскрышном уступе до производства взрывных работ и развале взорванного вскрышного уступа (рисунок 5).

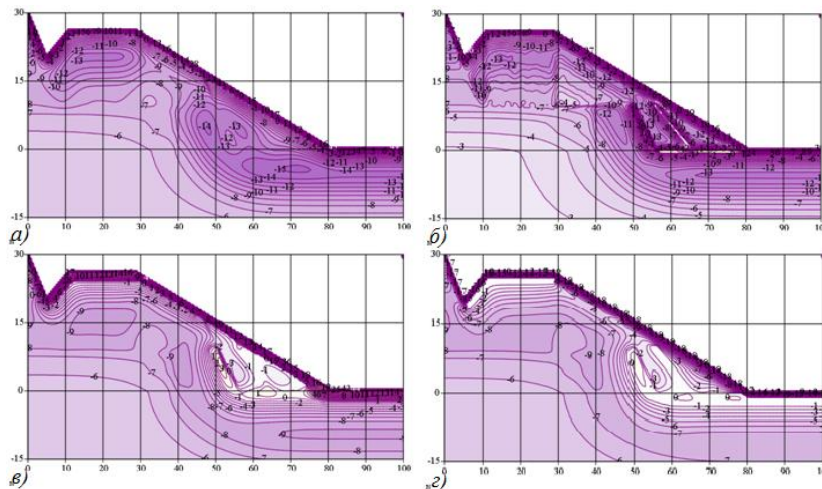


Рисунок 5 – Схемы формирования температурных полей взорванного массива ММГП через месяц после взрыва: а) – 1 мая, б) – 1 июля, в) – 1 августа, з) – 1 октября

Результаты этих расчетов свидетельствуют о том, что формирование температурных полей носит не хаотичный, а упорядоченный характер послойного распространения температуры по длине взорванного блока. Для первой половины года характерно наличие отрицательной температуры по всему сечению развала взорванной породы, а для второй половины года – наличие положительных температур в поверхностном слое развала.

В условиях отрицательных температур взорванного массива стабильная и максимальная производительность драглайна будет обеспечиваться в первую очередь наибольшим объемом растепленного слоя на поверхности развала. С учетом распределения температурных полей взорванного массива ММГП и особенностей условий месторождений криолитозоны для эффективной технологии экскавации драглайном наиболее приемлемой является схема отработки взорванного блока с послойным снятием растепленного слоя породы по длине экскаваторного блока. На данную технологию отработки смерзающегося взорванного массива получен патент РФ. Наиболее подходящей и эффективной является схема с установкой драглайна на поверхность развала на некотором расстоянии у кровли откоса так, чтобы при отработке слоя поверхности развала попутно снимать растепленный слой породы с его откоса, или на расстоянии максимального радиуса копания от верхней бровки его откоса (рисунок б).

Экскаватор снимает растепленный слой вдоль взорванного блока по направлению фронта горных работ. В зависимости от длины взорванного блока перемещается и также снимает растепленный слой, затем возвращается на исходную первую позицию и снимает очередной слой.

При таком расположении драглайна уменьшается средний угол поворота на разгрузку и, следовательно, продолжительность рабочего цикла. При этом отработанная часть блока оставляется для растепления и разупрочнения

поверхностного слоя под воздействием солнечной инсоляции в процессе отработки оставшейся части блока.

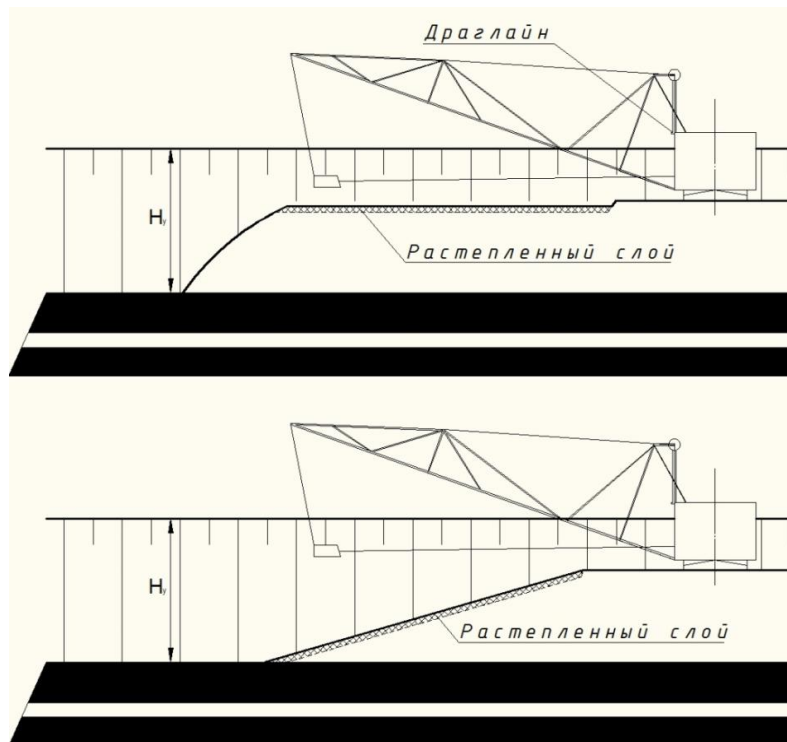


Рисунок 6 – Схемы отработки взорванного блока с послойным снятием растепленного слоя породы по длине экскаваторного блока

Таким образом, технология последовательного послойного снятия породы с поверхности развала обеспечит наибольшую производительность в условиях отрицательных температур в развале взорванной горной массы по сравнению со схемами отработки блока драглайном торцевым забоем с верхним и нижним черпанием.

Объем растепленного слоя на поверхности развала при данных схемах отработки взорванного массива горных пород зависит от высоты уступа, длины забоя и ширины заходки драглайна. Например, при ширине экскаваторной заходки - 45 м, длине блока - 100 м и средней глубине оттайки - 0,25 м (при температуре воздуха +20°C), объем растепленного слоя за сутки будет равным $45 \times 100 \times 0,25 = 1125 \text{ м}^3$. Это значит, что в этих условиях будет обеспечена стабильная работа экскаватора-драглайна с производительностью не менее 1125 м³/смену. При увеличении ширины заходки от 30 до 50 м, объем растепленного слоя увеличивается в 1,5 раза, соответственно производительность драглайна также увеличивается.

В условиях, когда драглайн снимает растепленный слой породы с откоса развала, высота уступа взрываемого блока будет определяющим фактором формирования объема растепленного слоя на откосе развала. Рекомендуемые параметры экскавации (высота уступа, ширина заходки, сменное подвигание забоя и производительность в зависимости от температуры породы) рассчитаны в

4 главе диссертации и переданы для использования на разрезе «Кангаласский» филиал АО ХК «Якутуголь».

Таким образом, обоснование производительности драглайна и рациональных параметров экскавации смерзающейся взорванной горной массы в условиях открытой разработки месторождений криолитозоны необходимо производить с учетом распределения температурного режима взорванной породы в экскаваторном забое, характера изменения гранулометрического состава породы в забое, схемы отработки блока и параметров забоя, а также температурно-климатических условий разработки.

2. Методика оценки показателя трудности экскавации, учитывающая изменение прочности смерзшихся вскрышных пород на срез на образцах, структурно сопоставимых с взорванным массивом горных пород, в зависимости от его температуры, влажности, гранулометрического состава и плотности упаковки, позволяющая обосновать условия эффективного применения бестранспортной технологии при разработке взорванных ММГП, склонных к повторному смерзанию.

В условиях экскавации драглайном взорванного массива пород месторождений криолитозоны, склонного к повторному смерзанию производительность драглайна зависит от температурного режима породы в забое, влияющего на прочностные характеристики взорванной горной массы. Ввиду отсутствия напорного усилия на ковше драглайна, отработка забоя ведется по всей его площади, в местах, где есть возможность осуществить копанье взорванной горной массы, с вынужденной тратой времени на «выкапывание» отдельных кусков и горной массы, частым холостым черпанием для наполнения ковша и периодическим изменением угла поворота. Многолетними натурными наблюдениями на разрезе «Кангаласский» отмечено, что в каких-то условиях экскавация смерзшейся взорванной горной массы драглайном ведется достаточно успешно, а в каких-то необходимо повторное рыхление бульдозером или привлечение экскаватора-мехлопаты вместо драглайна.

Эти особенности процесса экскавации предопределили необходимость обоснования в таких условиях области применения данного типа выемочной техники. Для решения поставленной задачи была разработана методика оценки относительного показателя трудности экскавации породы P_{Σ} , предложенного академиком В.В. Ржевским, на основе сопоставления пород по экскавируемости, зависящих от свойств пород.

Для разрушенных пород относительный показатель трудности экскавации определяется по формуле:

$$P_{\Sigma}'' = 0,022 \left(A + \frac{10A}{k_p} \right), \quad A = \gamma d_{cp} + 0,1\sigma_{cp},$$

где d_{cp} – средний размер кусков разрушенной породы в развале, см; σ_{cp} – предел прочности на срез, МПа; k_p – коэффициент разрыхления породы в развале; γ – плотность породы в кг/дм³.

Для расчета этого показателя необходимо знать предел прочности на срез. В натуральных условиях не предоставляется возможности исследовать сдвиговые характеристики смерзшихся взорванных вскрышных пород, вследствие чего была разработана специальная методика исследования прочности смерзшихся вскрышных пород на срез для последующей оценки показателя трудности экскавации. Соответствующие исследования были проведены на специально сконструированном стенде на образцах, структурно сопоставимых с взорванным массивом ММГП (рисунок 7).

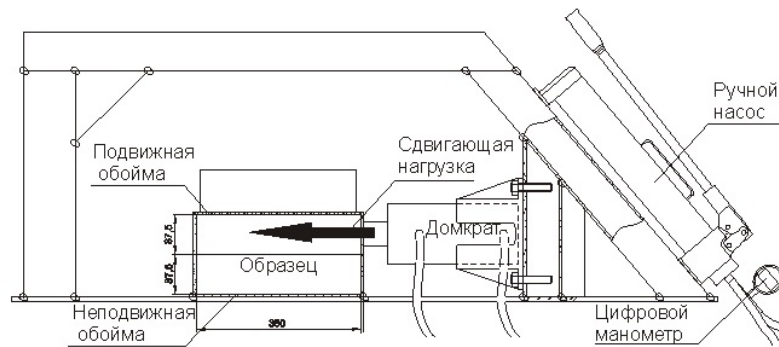


Рисунок 7 – Схема оригинального стенда для проведения испытаний на образцах, структурно сопоставимых с взорванным массивом ММГП

Отличительной особенностью проведенных исследований является то, что эксперименты выполнялись на больших образцах, способ изготовления которых защищен патентом РФ.

Образец представляет собой смерзшиеся включения (кубики) заданного размера с наполнителем из песчаника в соотношении 70% на 30%. Для изготовления образцов, имитирующих структуру смерзшегося взорванного массива, и проведения исследований выбраны следующие характеристики: температура замораживания образцов от -5°C до -15°C , влажность породы 5-15%, средний диаметр мерзлого куска (включения) от 10 до 50 мм, и три вида уплотняющей нагрузки от неуплотненного до уплотнения в 3,1 МПа (плотность упаковки). Плотность упаковки образцов характеризует (моделирует) условия сжимающего давления пород в развале на глубинах 10 и 20 м от поверхности развала и равна соответственно 1,6 и 3,1 МПа. Испытуемый образец устанавливался в срезную коробку и подвергался испытанию на стенде путем плавного увеличения сдвигающей нагрузки гидравлическим домкратом. Величина разрушающей нагрузки регистрировалась по максимальному значению давления, зафиксированному с помощью измерительного комплекса «Мера».

В соответствии с методикой исследований было выполнено большое количество испытаний на образцах однородной и нарушенной структуры. Каждое значение прочности на срез является средним значением, полученным при испытаниях 6 образцов, с доверительной вероятностью 0,95 и коэффициентом вариации в пределах 15-20%. Установлено, что образцы влажностью 5% не смерзаются и это является критической влажностью, при которой повторное смерзание пород Кангаласского месторождения не происходит. Поэтому при дальнейших экспе-

риментальных исследованиях были установлены минимальные значения влажности и температуры, которые составили соответственно 10% и -5°C , а максимальные значения – 15% и -15°C . При этих значениях влажности и температуры были проведены испытания для оценки влияния гранулометрического состава взорванных пород на прочность на срез при различной плотности упаковки.

Установлено, что прочность на срез образцов нарушенной структуры увеличивается с понижением температуры, а также с увеличением влажности и плотности упаковки. Размер включений в образцах нарушенной структуры при минимальных значениях влажности 10% и температуры -5°C (сопоставимых для вскрышных пород Кангаласского месторождения) не оказывает существенного влияния на прочность на срез. Однако с увеличением влажности и понижении температуры породы прочность на срез образцов изменяется в сторону снижения в зависимости от увеличения размера включений.

Выполненными экспериментальными исследованиями установлено, что при влажности 15% и температуре заморозки породы -15°C и при уплотнении образцов нарушенной структуры до 3,1 МПа значения прочности на срез в зависимости от размера среднего куска (1,67 и 1,76 МПа), сопоставимы с прочностными характеристиками однородного массива в тех же диапазонах температуры, влажности и уплотнения нагрузкой в 1,6 МПа (рисунок 8).

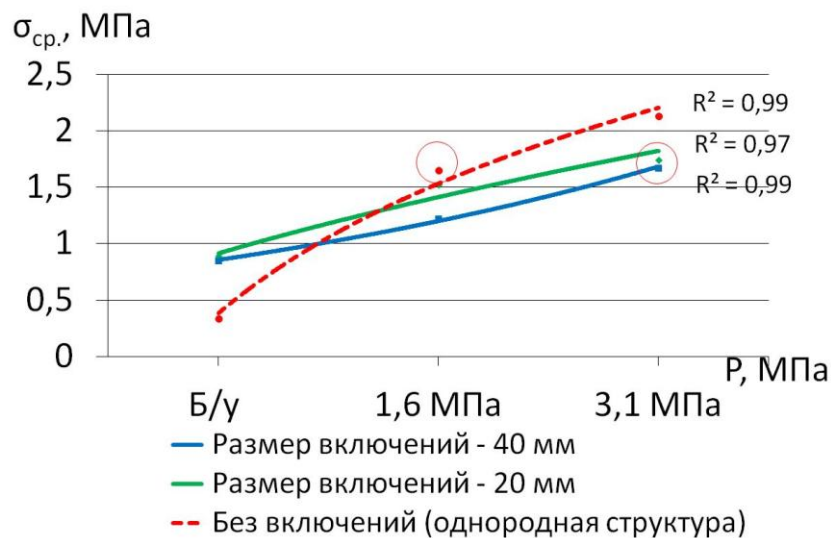


Рисунок 8 – Зависимость прочности на срез образцов нарушенной структуры с разным размером включений и без включений, при температуре -15°C и влажности 15% от плотности упаковки (б/у – без уплотнения, соответствует условиям расположения пород на поверхности развала, 1,6 МПа – соответствует условиям сжимающего давления пород на глубине 10 м от поверхности развала, 3,1 МПа – на глубине 20 м от поверхности развала)

Полученные результаты показывают, что взорванный массив ММГП, склонный к повторному смерзанию, является сложной средой, обладающей свойствами как нарушенного, так и однородного массива. Поверхность развала взорванной породы в условиях незначительных усилий нормального давления по высоте можно отнести к нарушенной (взорванной среде), а оставшаяся нижняя часть развала породы, в условиях более значительного давления, обладает свой-

ствами однородной среды (не нарушенного массива ММГП), что приводит к значительным трудностям экскавации, либо невозможности ее осуществления без дополнительного рыхления смерзшегося горного массива.

На основе полученных лабораторным путем значений предела прочности на срез на образцах нарушенной структуры рассчитаны показатели трудности экскавации. Установлено, что для условий разреза «Кангаласский» стабильная работа экскаватора-драглайна при экскавации взорванного смерзающегося массива ММГП будет обеспечена при показателе трудности экскавации до 6, что соответствует отработке верхней части развала. Средняя часть развала по высоте и ниже характеризуются показателем трудности экскавации 6 и более. В этих условиях экскавации смерзшегося взорванного массива существенно затруднен разбор забоя, снижается наполнение ковша, что, в конечном счете, приводит к увеличению времени рабочего цикла экскаватора и снижению его производительности. Полученные результаты расчетов подтверждаются многолетней практикой ведения горных работ на разрезе «Кангаласский».

Таким образом, разработанная методика позволила обосновать область эффективного применения драглайна ЭШ-10/70 для условий разреза «Кангаласский» на основе установленных закономерностей изменения прочности на срез образцов, структурно сопоставимых с взорванным массивом, в зависимости от температуры, влажности, гранулометрического состава и плотности их упаковки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе дано решение важной научно-практической задачи обоснования производительности драглайна и рациональных параметров экскавации взорванных ММГП, позволяющее снизить негативное влияние процесса их повторного смерзания на эффективность бестранспортной системы разработки.

Основные результаты диссертационной работы заключаются в следующем:

1. Установлено, что основными факторами, характеризующими процесс смерзания взорванных ММГП, являются температура и влажность горных пород, а также природно-климатические условия. Получена оценка их влияния на эффективность ведения открытых горных работ при разработке пластовых месторождений в условиях криолитозоны.

2. Установлены особенности формирования температурного режима в развале взорванных ММГП в разные периоды года и влияние температуры поверхностного слоя смерзающихся горных пород на производительность драглайна. Так, фактическое время рабочего цикла драглайна с понижением температуры поверхностного слоя пород забоя (от +5°C до -17°C) увеличивается в среднем в несколько (до 3,5) раз и, соответственно, снижается его производительность.

3. Определена зависимость производительности драглайна от температуры поверхностного слоя взорванного массива при последовательном обнажении забоя. При одной и той же отрицательной температуре породы в забое драглайна, снижение производительности экскаватора происходит в наибольшей степени в

весенний период, когда процесс смерзания наиболее интенсивен.

Для вычисления продолжительности времени цикла драглайна в разные периоды года выведены эмпирические формулы:

Весна-лето: $t_{ц} = e^{0,34-0,044T_{п}+9,58 \cdot 10^{-4}T_{п}^2}$, мин.;

Осень-зима: $t_{ц} = 0,63e^{-0,03T_{п}}$, мин.,

где $T_{п}$ – температура пород в забое, °С.

4. По результатам натуральных исследований установлен характер изменения гранулометрического состава кусков породы в развале и забое драглайна, при этом отмечено, что при повышении температуры поверхности породы доля крупных фракций (>500 мм) существенно снижается (до 3 раз), а доля фракций 201-300 мм возрастает в 1,5-2 раза.

5. Разработан специализированный стенд и проведены исследования прочности смерзшихся вскрышных пород на срез на образцах, структурно сопоставимых с взорванным массивом горных пород, что позволило оценить показатель трудности их экскавации и обосновать условия эффективного применения бестранспортной технологии при открытой разработке месторождений криолитозоны на примере разреза «Кангаласский».

6. Экспериментально установлено, что прочность на срез образцов, структурно сопоставимых с взорванным массивом ММГП, растет с понижением температуры, а также с увеличением влажности и плотности упаковки. Размер включений в образцах нарушенной структуры при минимальных значениях влажности 10% и температуры -5°С (по условиям эксперимента, для вскрышных пород Кангаласского месторождения) не оказывает существенного влияния на прочность на срез. Однако с увеличением влажности и понижении температуры породы прочность на срез образцов, структурно сопоставимых с взорванным массивом, изменяется в сторону снижения в зависимости от увеличения размера включений.

7. Обоснованы рациональные параметры и технология ведения вскрышных работ в разные периоды года (весна-лето, осень-зима), в частности, в весенне-летний период высоту уступа следует принимать в диапазоне от 15 м до 25 м, а ширину заходки 40 и 50 м при послыной отработке взорванного экскаваторного блока и превентивным орошением зон повторного смерзания растворами ПАВ, для осенне-зимнего периода рекомендуется бестранспортная схема с торцевым забоем и нижним черпанием, расположением драглайна на кровле развала с высотой вскрышного уступа до 25 м и шириной вскрышной заходки 40 м.

Последующее развитие представленной научной работы послужит основой для дальнейших исследований по обоснованию области эффективного использования различных типов выемочного оборудования при открытой разработке месторождений криолитозоны с учетом фактора повторного смерзания взорванного горного массива.

Основные научные результаты диссертации опубликованы:

***В рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК
Минобрнауки России:***

1. Панишев, С. В. Особенности разработки смерзающихся вскрышных пород драглайном в условиях пластового месторождения криолитозоны / С. В. Панишев, С. А. Ермаков, М. С. Максимов, Е. Л. Алькова // Горный информационно-аналитический бюллетень Отд. выпуск. : Дальний Восток. – 2013. – № ОВ 4. С. 38 – 49.

2. Панишев, С. В. Комплексный мониторинг температурного режима многолетнемерзлых горных пород Кангаласского угольного разреза / С. В. Панишев, С. А. Ермаков, М. В. Каймонов, М. С. Максимов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2013. – № 9. – С. 62 – 70.

3. Панишев, С. В. Мониторинг производительности драглайна с использованием тепловизионной съемки забоя и системы лазерного сканирования в условиях пластового месторождения криолитозоны / С. В. Панишев, С. А. Ермаков, М. С. Максимов, Д. С. Козлов, И. В. Васильев // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2014. – № 4. – С. 117 – 122.

4. Панишев, С. В. Рекомендации по отработке драглайном взорванного многолетнемерзлого массива / С. В. Панишев, М. В. Каймонов, М. С. Максимов, Д. С. Козлов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2014. – № 10. – С. 66 – 71.

5. Панишев, С. В. Комплексный мониторинг работы драглайна на угольном месторождении криолитозоны. / С. В. Панишев, Д. С. Козлов, М. С. Максимов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2015. – № 7. Спец. выпуск. 30. : Геомеханические и геологические проблемы освоения недр Севера – С. 185 – 193.

6. Алькова, Е. Л. Экспериментальные исследования прочности на срез мерзлых горных пород на образцах большого размера / Е. Л. Алькова, С. В. Панишев, М. С. Максимов, Д. С. Козлов // Успехи современного естествознания – 2016. – № 8. – С. 145 – 149.

7. Панишев, С. В. Исследование прочностных характеристик мерзлых образцов однородной и нарушенной структуры / С. В. Панишев, Е. Л. Алькова, М. С. Максимов // Успехи современного естествознания – 2018. – № 11. – С. 383 – 388.

8. Панишев, С. В. К оценке показателя трудности экскавации смерзающегося взорванного массива горных пород / С. В. Панишев, Е. Л. Алькова, М. С. Максимов // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых – 2019. – № 3. – С. 31 – 36.

9. Алькова, Е. Л. Оценка относительного показателя трудности экскавации взорванного массива в условиях криолитозоны / Е. Л. Алькова, С. В. Панишев, М. С. Максимов // Успехи современного естествознания – 2020. № 11. – С. 32 – 38.

10. Максимов, М. С. О проблеме вторичного смерзания пород и его влиянии на эффективность бестранспортной разработки месторождений криолитозоны / М. С. Максимов // Рациональное освоение недр – 2020. № 2. С. 44 – 53.

11. Maksimov, M.S. Preparation of frozen rock samples for shear tests / Published under licence by IOP Publishing Ltd IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Volume 773 M.S Maksimov and D.S Kozlov 2021 IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 773 012075 3p.

12. Максимов, М. С. Исследование влияния размеров включений на прочность смерзшихся образцов горных пород на срез / М. С. Максимов, С. В. Панишев, Е. Л. Алькова // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 12-1. – С. 139 – 147.

13. Алькова, Е. Л. Исследование влияния содержания мелкой и крупной фракции на показатель трудности экскавации смерзающегося взорванного массива горных пород / Е. Л. Алькова, С. В. Панишев, М. С. Максимов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 12-1. – С. 29 – 38.

Патенты:

14. Патент на изобретение № 2542007 Российская Федерация, МПК Е 21 С 41/26. Способ разработки смерзающихся вскрышных пород : № 2013159241/03 : заявл. 30.12.2013 : опубл. 20.02.2015 / Панишев С. В., Ермаков С. А., Каймонов М. В., Зарубин В. А., Зедгенидзе А. И., Максимов М. С., Козлов Д. С. ; заявитель и патентообладатель ФГБУН Институт горного дела Севера им. Н.В. Черского СО РАН // Бюл. № 5.

15. Патент на изобретение № 2629610 Российская Федерация, МПК G01N 33/24. Способ изготовления смерзшихся образцов, структурно сопоставимых с взорванным массивом горных пород : № 2016121595 : заявл. 31.05.2016 : опубл. 30.08.2017 / Панишев С. В., Ермаков С. А., Алькова Е. Л., Максимов М. С., Козлов Д. С. ; заявитель и патентообладатель ФГБУН Институт горного дела Севера им. Н.В. Черского СО РАН // Бюл. № 25.

В прочих научных изданиях:

16. Алькова, Е. Л. К вопросу о трудности экскавации смерзающегося взорванного массива / Е.Л. Алькова, С. В. Панишев, М. С. Максимов // Тенденция развития науки и образования – 2019. – № 54-1. – С. 21 – 25.

17. Максимов, М.С. Подготовка образцов смерзшихся горных пород для испытаний прочности на срез / М.С. Максимов, Д.С. Козлов // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук – 2019. – Т.6, № 3. – С. 297 – 300.

18. Панишев, С. В. К вопросу прогноза производительности драглайна при экскавации смерзающейся взорванной горной массы в условиях месторождений криолитозоны / С. В. Панишев, М. В. Каймонов, М. С. Максимов, Е. Л. Алькова // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. – 2022. – Т.9, – № 3. С. 136 – 140.

Подписано в печать 27.03.2024. Формат 60x84/16.
Печать цифровая. Печ. л. 1,5. Уч.-изд. л. 1,75. Тираж 100 экз. Заказ № 51.
Издательский дом Северо-Восточного федерального университета
677891, г. Якутск, ул. Петровского, 5.
Отпечатано в типографии ИД СВФУ