

Анализ методик и конструкций стендов для исследования процесса резания пород различными типами рабочих органов горного оборудования

С.В. Панишев, Е.Л. Алькова, М.С. Максимов, Д.В. Хосоев✉

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

✉ hosoev70@mail.ru

Резюме: Мерзлые вскрышные породы зоны многолетней мерзлоты склонны к смерзанию после их взрывного разрушения вплоть до образования монолита вне зависимости от времени года. Для прогноза снижения уровня производительности выемочной техники в таких условиях необходимо изучение процесса резания смерзшихся пород различными типами рабочих органов горного оборудования.

В статье приведен анализ существующих лабораторных стендов и экспериментальных установок, а также методик проведения работ, опубликованных в научно-технической литературе в области исследования процессов резания крепких и мерзлых пород различными типами рабочих органов горного оборудования. Большинство исследований процесса резания проводятся на однородных образцах в основном для обоснования рациональных параметров режущих элементов, для чего авторами разрабатываются лабораторные модели, так как в полевых условиях практически невозможно охватить весь спектр изменения физико-механических характеристик мерзлых грунтов.

Отмечается, что существующие лабораторные стенды и экспериментальные установки позволяют исследовать на образцах и в натуральных условиях силовые, энергетические показатели процессов резания и параметры элементарных сколов от глубины воздействия резцов. В то же время проведенный обзор показал, что в научно-технической литературе практически отсутствует информация по лабораторным или полевым исследованиям процесса резания вторично смерзшегося взорванного массива многолетнемерзлых горных пород.

Ключевые слова: угол скола, промерзание, землеройные машины, глубина отбитого развала, прочность пород, толщина стружки, одиночный зуб, криолитозона

Благодарности: Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема №0297-2021-0020, ЕГИСУ НИОКТР №122011800086-1).

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП ФИЦ ЯНЦ СО РАН, грант №13. ЦКП. 21.0016.

Для цитирования: 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):103–108. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-6-103-108>

Analysis of methods and designs of test benches for studying the process of rock cutting by different types of cutting tools of mining equipment

S.V. Panishev, E.L. Alkova, M.S. Maksimov, D.V. Khosoev✉

Institute of Mining of the North named after N.V. Chersky of the Siberian branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russian Federation

✉ hosoev70@mail.ru

Abstract: Frozen overburden rocks of the permafrost zone are prone to congealing upon their blasting, up to formation of a monolith, regardless of the time of year. In order to predict the decrease in the productivity level of mining equipment in such conditions, it is necessary to study the process of cutting the frozen rocks by different types of cutting tools of the mining machines.

The article analyzes the existing laboratory benches and experimental devices, as well as methods of work execution that were published in research and technical literature dedicated to investigating the process of cutting hard and frozen rocks by different types of cutting tools of mining equipment. Most studies of the cutting process are carried out on homogeneous samples mainly to

justify rational parameters of the cutting tools, for which the authors develop laboratory models, since it is practically impossible to cover the entire range of changes in the physical and mechanical characteristics of frozen soils in field conditions. It is noted that the existing laboratory benches and experimental devices make it possible to study the force and energy indices of the cutting processes as well as the parameters of elementary chipping depending on the depth of the cutter impact on samples and in natural conditions. At the same time, the review has shown that in the scientific and technical literature there is practically no information on laboratory or field studies of the cutting process of re-frozen blasted mass of permafrost rocks.

Keywords: chipping angle, freezing, earthmoving machines, muck pile depth, rock strength, chip thickness, single tooth, cryolithic zone

Acknowledgments: The study was carried out within the State Assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Topic No.0297-2021-0020, EGISU NIOCTR No.122011800086-1).

The work was performed using equipment and instruments that belong to the Shared core facilities of the Federal Research Center, Yakutsk Scientific Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Grant No.13. ЦКП. 21.0016.

For citation: Panishev S.V., Alkova E.L., Maksimov M.S., Khosoev D.V. Analysis of methods and designs of test benches for studying the process of rock cutting by different types of cutting tools of mining equipment. *Russian Mining Industry*. 2023;(6):103–108. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-6-103-108>

Введение

Одним из путей успешного развития горнодобывающих предприятий Севера является создание и внедрение эффективных научных разработок средств механизации и рабочих органов для разработки прочных мерзлых пород на карьерах. Огромный вклад в создание и совершенствование существующей современной землеройной техники, а также основы теории резания мерзлых пород внесли выдающиеся современные ученые: Н.Г. Домбровский, А.Н. Зеленин, М.П. Гальперин, А.И. Федулов, Ю.А. Ветров, И.А. Недорезов, В.И. Баловнев и др. Полученные результаты позволили определить основные направления и принцип совершенствования рабочих органов различных типов выемочной горной техники.

Современная горнодобывающая техника представлена различными типами выемочных машин, рабочие органы которых в процессе работы непосредственно внедряются в горный массив. Однако, как показывает практика ведения открытых горных работ в суровых климатических условиях Севера, мерзлые вскрышные породы зоны многолетней мерзлоты склонны к смерзанию после их взрывного разрушения, вплоть до образования монолита вне зависимости от времени года.

Таким образом, есть основание утверждать, что выбор типа и марки выемочного оборудования необходимо осуществлять с учетом всех физико-технических особенностей взорванного смерзающегося массива.

В ИГДС им. Н.В. Черского СО РАН изучается проблема смерзания горной массы после взрыва, для этого был сконструирован стенд для изучения прочности смерзшихся пород на срез в лабораторных условиях. Разработан способ изготовления уникального образца, который имитирует структуру смерзающегося взорванного массива, оригинальность которого подтверждена патентом [1].

Экспериментальными исследованиями искусственно созданных образцов различной температуры и влажности было получено большое количество значений прочностных характеристик с имитацией смёрзшегося разрыхленного буровзрывными работами массива. Эти данные показывают, что на глубине развала 20 м породы быстро уплотняются и набирают прочность, сопоставимую с прочностью неразрушенного массива, что затрудняет и даже исключает возможность их экскавации. Для прогноза снижения уровня производительности выемочной техники в таких условиях необходимо изучение процесса резания смерзшихся пород рабочими органам горного оборудо-

вания при различных физико-технических параметрах: влажности, температуре, гранулометрическом составе и плотности упаковки.

Первоначальной задачей исследований является обзор научно-технической литературы в данном направлении, который позволит проанализировать существующие методики резания мерзлых грунтов, конструкции лабораторных стендов и выбрать наиболее подходящий аналог для разработки конструкции стенда по исследованию процессов резания взорванного смерзшегося массива горных пород.

Результаты и обсуждение

В Тихоокеанском государственном университете были проведены экспериментальные стендовые исследования по резанию мерзлых мелкозернистых пород одиночным зубом в лабораторных и полевых условиях. Резание осуществлялось на глинистых, суглинистых, супесчаных и песчаных породах различными способами, а именно: блокированным, сотовым, щелевым и свободным (рис. 1).

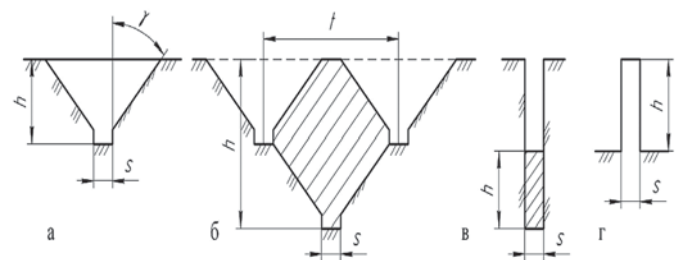


Рис. 1
Способы резания мерзлой породы:
а – блокированный;
б – сотовый;
в – щелевой;
г – свободный

Fig. 1
Methods of cutting frozen rock: a – blocked;
б – honeycomb;
в – slit-type;
г – freehand

При блокированном резании режущая часть рабочего органа разрушает породу передней и двумя боковыми режущими кромками, при сотовом способе также происходит разрушение породы передней и двумя боковыми режущими кромками зуба, но верхняя часть вырезаемого пласта оголена предыдущими проходами зубьев. При щелевом способе рабочий орган входит в прорезь (щель), сделанную предыдущими проходами зубьев, но на боль-

шую глубину и вытягивает вырезанный сегмент пласта через щель на поверхность. При свободном – только передней режущей кромкой.

В процессе экспериментальных исследований были установлены зависимости коэффициентов удельных сопротивлений щелевому резанию от ширины зуба и крепости породы. Изменение ширины режущей кромки зуба s оказывает существенное влияние на изменение коэффициентов удельных сопротивлений щелевому резанию. С увеличением ширины s (в пределах исследованных значений s 2...6 см) коэффициенты удельного сопротивления уменьшаются по кривой гиперболического типа. В пределах исследуемых параметров не было выявлено влияния типа мелкозернистой породы на коэффициент удельного сопротивления щелевому способу резания. При щелевом резании коэффициенты удельного сопротивления значительно выше (в 10–15 раз) коэффициентов удельного сопротивления сотового резания и пропорциональны числу «с».

Согласно проведенным экспериментам значения коэффициентов удельного сопротивления резанию мерзлой породы свободным способом вдвое меньше, чем блокированным, и это вполне согласуется с данными других исследователей [2].

В диссертационной работе С.А. Шемякина [3] говорится о том, что в результате многочисленных и длительных экспериментальных исследований по резанию и последующему черпанию мерзлых пород, проведенных автором в полевых и лабораторных условиях на натуральных моделях рабочих органов и на машинах, позволили достаточно полно представить физическую сущность процесса резания (рыхления) мерзлой мелкозернистой породы.

Исследования проводились на полигоне и в лаборатории сотрудниками кафедры «Строительные и дорожные машины» Хабаровского государственного технического университета (ХГТУ). Стенд послыонного резания породы, разработанный и изготовленный под руководством С.А. Шемякина, агрегируется с трактором ДТ-54. Параметры стенда: скорость резания – 0...0,8 м/с, усилие резания до 180 кН, глубина резания – 0–0,4 м. Стенд состоит из тензометрической тележки 1 и рамы 2 (рис. 2), установленной в рабочем положении на лыжах 3 и связанной с трактором шаровым шарниром 4. В транспортном положении рама опирается на пневматические колеса 5. С помощью винтовых домкратов 6, связанных с лыжами, регулируется высота установки рамы над поверхностью породы. Тензо-

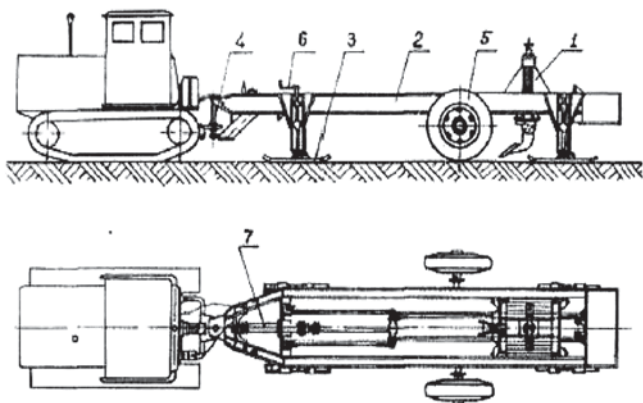


Рис. 2
Схема экспериментального стенда

Fig. 2
A schematic diagram of the experimental stand

тележка передвигается по направляющим рамы гидроцилиндром 7, который питается от гидросистемы трактора. Система подвески рабочего органа позволяет независимо измерять касательную и нормальную составляющие усилия резания.

Физическая сущность процесса резания заключается в том, что перед лобовой поверхностью движущегося инструмента (зуба) происходит пластическая деформация породы с образованием так называемого уплотненного ядра. Процесс выемки представляет собой периодическое отделение элементов стружки. Отделяемые элементы в большинстве случаев имеют конусообразную форму.

Выявлены характер и степень зависимости среднемаксимальной касательной составляющей сопротивления резанию (рыхлению) мерзлой породы от количества в ней (по массе) крупнообломочных включений.

Из расчетной схемы (рис. 3) касательная P_{01} и нормальная P_{02} составляющие определяются из выражений:

$$2 \left(\frac{R_x}{2} \right) - P_{01} = 0; \quad 2 \left(\frac{R_x}{2} \right) a - P_{01} b - P_{02} c = 0;$$

$$P = \frac{R_y a - P_{01} b}{c} \quad (1)$$

Нормальная составляющая P_{02} измеряется датчиками, и ее величина определяется с учетом того, что деформации оси в вертикальной плоскости происходят и под действием силы P_{01} . Измерение сил P_{01} и P_{02} дублировалось датчиками, наклеенными соответственно на тяге, шарнирно соединяющей шток гидроцилиндра с рамой тензотележки.

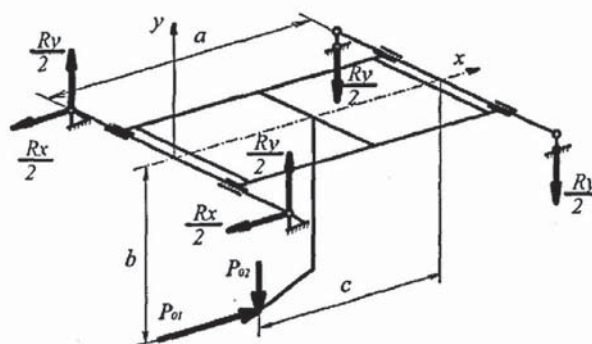


Рис. 3
Расчетная схема для определения усилий резания в тензоэлементах подвески рабочего органа

Fig. 3
A calculation diagram for determining the cutting forces using the strain gauges inside the cutting tool suspension elements

Процентное содержание по массе крупнообломочных включений, крепость которых больше породы-связки, оказывает существенное влияние на величину как касательной, так и нормальной составляющих сопротивления резанию. При увеличении процентного содержания включений до 35–40% происходит возрастание составляющих сопротивления резанию из-за вдавливания части включений площадкой затупления и боковыми кромками зуба в массив породы в области уплотненного ядра, а также из-за увеличения объема уплотненного ядра, формирующегося перед включением. Дальнейшее увеличение включений выше 45–50% приводит к уменьшению составляющих сопротивлений резанию, поскольку при большом количестве включений связующей мелкозернистой породы становит-



Рис. 4
Стенд для исследования процесса резания кембрийской глины одиночным резцом

Fig. 4
A test bench for studying the process of cutting Cambrian clay using a single cutter

ся недостаточно для цементирования всех включений, происходит соприкосновение их между собой и, как результат, не возникает прочной связи всего массива породы.

С.А. Лаврененко, И.С. Труфановой [4] предлагается режущо-испытательный стенд для экспериментальных исследований процесса резания одиночным резцом (рис. 4).

Стенд является физической моделью процесса разрушения массива кембрийской глины одиночным резцом и позволяет исследовать силовые, энергетические показатели процесса резания и параметры элементарных сколов. По результатам моделирования получены значения усилий на резце в зависимости от глубины его внедрения и скорости резания. С ростом толщины стружки (глубины внедрения резца) в диапазоне 10–13 мм наблюдается уменьшение усилий резания, независимо от скорости резания V_p , усилия резания остаются постоянными и равны примерно $P_z = 160$ Н.

Значение средней силы резания (математического ожидания) при $h = 15$ мм и $\alpha = 60^\circ$ составляет $P_{z, \text{cp}} = 244,6$ Н, а удельные энергозатраты процесса разрушения кембрийской глины равны $H_w = 0,87$ кВт·ч/м³.

В работе [5] рассматривается стенд для экспериментальных исследований процесса резания калийных руд одиночным резцом горных машин.

Установка позволяет изучать процесс образования последовательных элементарных сколов, составляющих срез, а также устанавливать зависимости изменения параметров последовательных элементарных сколов в срезе от режимных параметров процесса резания, конструктивных параметров режущего инструмента, типа схемы резания.

В статье В.Н. Кузнецовой [6] представлена методика проведения и проведен анализ результатов экспериментальных исследований по определению аналитических зависимостей и численных значений коэффициентов, входящих в математическую модель контактного взаимодействия рабочих органов землеройных машин с мерзлым грунтом. Моделирование процесса проводилось с целью учета физико-механических свойств мерзлых грунтов и установления нелинейности характера распределения напряжений на контактной поверхности рабочего органа.

Разработаны программа и методика проведения экспериментальных исследований с использованием специально созданных экспериментальной установки и модели рабочего органа землеройной машины (рис. 5).

На подвижной тележке грунтового канала закрепляется экспериментальная модель рабочего органа землерой-

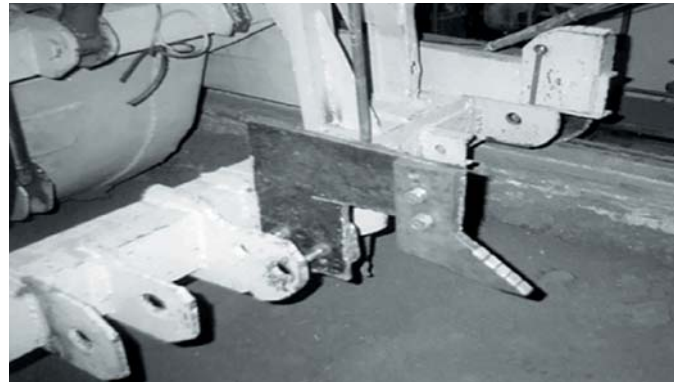


Рис. 5
Экспериментальная установка с моделью рабочего органа

Fig. 5
An experimental device with a cutting tool model

ной машины (модель зуба рыхлителя мерзлых грунтов). Модель представляет собой металлическую конструкцию, в которой по всей длине режущей кромки выфрезерованы 5 канавок размером 20×20 мм.

В каждой канавке высверлено по четыре сферических углубления, в которых размещены на одном уровне стальные шарики. В канавки модели зуба помещаются сменные элементы (алюминиевые пластины), которые при проведении эксперимента с одной стороны опираются на четыре шарика, а с другой – контактируют с разрабатываемым грунтом. Алюминиевые пластины в данном эксперименте являются индикаторами сил воздействия грунта на рабочий орган. В качестве модели мерзлого грунта использовался предварительно замороженный супесчаный грунт, размещенный в металлическом коробе.

При передвижении подвижной тележки в грунтовой канале экспериментальный зуб внедрялся в грунт. При этом металлические шарики вдавливались в алюминиевые пластины, оставляя на последних отпечатки определенного диаметра.

Следующей задачей являлось определение величины силы, возникающей при рыхлении мерзлого грунта, по всей длине рабочей поверхности экспериментального зуба по пятну контакта на алюминиевой пластине от шариков (рис. 6).



Рис. 6
Пластины с отпечатками

Fig. 6
Plates with imprints

Для этого были замерены диаметры отпечатков шариков на пластинах.

Проведенные экспериментальные исследования по физическому моделированию процесса взаимодействия рабочего органа землеройных машин с мерзлым грунтом позволили адаптировать теоретические исследования к реальным условиям эксплуатации и режимам работы техники, установить значения коэффициентов, входящих в математическую модель процесса взаимодействия рабочих органов землеройных машин с мерзлым грунтом.

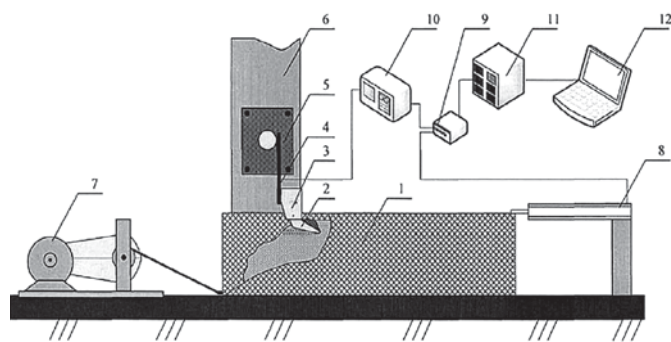


Рис. 7
Лабораторная установка для определения сопротивления рыхлению мерзлых грунтов:
1 – металлический короб, наполненный грунтом;
2 – модель зуба рыхлителя;
3 – механизм крепления зуба;
4 – стойка с тензодатчиками;
5 – кронштейн; 6 – балка;
7 – механизм привода;
8 – датчик перемещения;
9 – коммутационная колодка;
10 – аналого-цифровой преобразователь;
11 – кейт LTC-26;
12 – ноутбук с программным обеспечением

Fig. 7
A laboratory device for determining the resistance to ripping of frozen soils:
1 – a metal box filled with soil;
2 – a model of a ripper tooth;
3 – the tooth fixing mechanism;
4 – a rack with the strain gauges;
5 – a bracket; 6 – a beam;
7 – the drive mechanism;
8 – a displacement sensor;
9 – a switching block;
10 – an analog-to-digital signal converter;
11 – the LTC-26 crate;
12 – a laptop with the dedicated software

Для определения усилий рыхления мерзлых грунтов при различных углах резания сотрудниками кафедр «Дорожные машины» и «Эксплуатация дорожных машин» (СибАДИ г. Омск) была разработана лабораторная установка [7] (рис. 7).

При определении сопротивлений процесса рыхления в качестве мерзлого грунта в данных исследованиях применялся эквивалентный материал на цементной основе, предложенный В.И. Баловневым [8].

Цемент позволяет смоделировать льдистую составляющую мерзлого грунта с целью придания ему прочности. Варьированием процентных отношений цемента песка и глины в смеси можно моделировать наиболее распространенные типы мерзлых и талых грунтов: супеси и суглинка. Тип моделируемого грунта зависит от процентного соотношения связующего – цемента и наполнителя. Доля цемента при проведении эксперимента составляла 8% от массы наполнителя (песок и глина).

Оценка категории грунта проводилась с применением ударника Дор-НИИ, физико-механические свойства определялись в лабораторных условиях согласно ГОСТ 12248–96.

Проведенный анализ результатов исследования по рыхлению мерзлых грунтов рыхлителями статического действия показал:

- мерзлые грунты относятся к труднорабатываемым материалам, прочностные свойства которых значительно зависят от температуры, плотности и влажности;
- существующие функциональные зависимости, определяющие усилия рыхления мерзлых грунтов, не учитывают геометрию наконечника рыхлителя, которая в значительной мере влияет на изменение усилий рыхления и производство работ по разработке мерзлых грунтов;
- нет четких рекомендаций по применению различных форм наконечника рыхлителя в зависимости от условий производства работ.

Для изучения процесса разрушения горных пород в лаборатории кафедры «Транспортно-технологические системы в строительстве и горном деле» Тихоокеанского государственного университета был спроектирован и изготовлен экспериментальный стенд для моделирования взаимодействия резцов фрезерного барабана карьерного комбайна [9].

Фрезерный рабочий орган представляет собой барабан, на котором по определенной схеме установлены резцы. Для рациональной расстановки резцов с целью обеспечения высокой производительности и снижения удельной энергоемкости разрушения необходимо знать угол скола пород. От угла скола зависит объем породы, отделяемой от массива при проходе резца. Также необходимо учитывать, что фрезерные горные комбайны работают в большом диапазоне рабочих скоростей и с разной по величине толщиной стружки, поэтому необходимо выяснить, имеет ли влияние на геометрические параметры скола глубина резания породы резцом. Экспериментальные исследования проводились в лаборатории «Проблем освоения рудных и нерудных месторождений открытым способом» Института горного дела ДВО РАН. Исследования проводились с использованием образцов строительных горных пород, добываемых в Еврейской автономной области и Хабаровском крае. Предлагаемый экспериментальный стенд позволяет выявлять не только геометрические параметры скола, получаемого при прохождении резца, но и определять численные значения сопротивления резанию породы резцом. Стенд обеспечивает возможность проведения нескольких резов на одном образце горной породы. Данные по результатам резания различных горных пород, полученные на стенде, возможно использовать для обоснования рациональной расстановки резцов применительно к породам конкретного месторождения.

Выводы

Выполненный обзор показал, что в научно-технической литературе отсутствует информация по лабораторным или полевым исследованиям процесса резания вторично смёрзшегося взорванного массива многолетнемерзлых горных пород.

Все исследования процесса резания проводятся на однородных образцах в основном для обоснования рациональных параметров режущих элементов, для чего авторами разрабатываются лабораторные модели, так как в полевых условиях практически невозможно охватить весь спектр изменения физико-механических характеристик мерзлых грунтов. Предлагаемые ими стенды позволяют исследовать силовые, энергетические показатели процесса резания и параметры элементарных сколов от глубины воздействия и формы резца, а также выявлять характер и степень зависимости сопротивления резанию мерзлой породы от количества в ней крупнообломочных включений (по массе). Изучение процесса резания смёрзшегося взорванного массива является важной задачей, так как прочность смёрзшейся взорванной породы в развале через определенное время становится сравнимой с прочностью монолита, что сказывается на работе выемочной техники вплоть до полной остановки экскавации.

Для дальнейших исследований по определению прочности вторично смёрзшегося массива в качестве прототипа может быть предложена лабораторная установка, разработанная сотрудниками кафедр «Дорожные машины» и «Эксплуатация дорожных машин» (СибАДИ г. Омск) [8].

Список литературы

1. Панишев С.В., Ермаков С.А., Алькова Е.Л., Максимов М.С., Козлов Д.С. Способ изготовления смерзшихся образцов, структурно сопоставимых с взорванным массивом горных пород. Патент на изобретения RU 2629610 С, 30.08.2017. Заявка №2016121595 от 31.05.2016. Режим доступа: <https://patents.google.com/patent/RU2629610C1/ru>
2. Шемякин С.А., Иванченко С.Н., Мамаев Ю.А., Чебан А.Ю., Еренков А.В. Оценка составляющих сопротивления копания на ковшх роторного траншейного экскаватора при выемке мерзлых пород. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2010;(S4):96–104.
3. Шемякин С.А. *Обоснование эффективных технологий открытых горных работ на основе совершенствования процесса выемки пород: дис. ... д-ра техн. наук*. Хабаровск; 2004. 362 с.
4. Лаврененко С.А., Труфанова И.С. Экспериментальные исследования процесса разрушения кембрийских глин режущим инструментом. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2015;(5):113–119. Режим доступа: https://giab-online.ru/files/Data/2015/05/113_119.pdf
5. Габов В.В., Шефнер А.Д., Шишлянников Д.И., Чекмасов Н.В. Стенд для экспериментальных исследований процесса резания калийных руд одиночным резцом горных машин. *Записки Горного Института*. 2012;195:245–248.
6. Кузнецова В.Н. Физическое моделирование процесса контактного взаимодействия рабочего органа землеройной машины с мерзлым грунтом. Вестник Томского государственного университета. *Математика и механика*. 2019;(61):70–81. <https://doi.org/10.17223/19988621/61/7>
7. Сачук А.Ю. *Обоснование выбора технологических параметров рыхлителя статического действия при разработке мерзлых грунтов: дис. ... канд. техн. наук*. Омск; 2007. 186 с.
8. Баловнев В.И. *Моделирование процессов взаимодействия со средой рабочих органов дорожно-строительных машин*. М.: Высшая школа; 1981. 335 с.
9. Чебан А.Ю. Экспериментальные исследования процесса разрушения породы резцами фрезерного рабочего органа. *Вестник Тихоокеанского государственного университета*. 2012;(1):125–128. Режим доступа: <https://pnu.edu.ru/vestnik/pub/articles/1663/>

References

1. Panishev S.V., Ermakov S.A., Alkova E.L., Maksimov M.S., Kozlov D.S. Method of manufacturing frozen samples structurally comparable with exploded massif of roaches. Invention patent. RU 2629610 C, 30.08.2017. (In Russ.) Available at: <https://patents.google.com/patent/RU2629610C1/en>
2. Shemyakin S.A., Ivanchenko S.N., Mamaev Yu.A., Cheban A.Yu., Erenkov A.V. Estimation of the resistance components to digging on the buckets of a rotary trench digger during excavation of frozen rocks. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2010;(S4):96–104. (In Russ.)
3. Shemyakin S.A. *Justification of effective technologies for surface mining based on the improved rock excavation process* [Dr. Sci. (Eng.) diss.]. Khabarovsk; 2004. 362 p. (In Russ.)
4. Lavrenko S.A., Trufanova I.S. Experimental studies of Cambrian clay cutting tool. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2015;(5):113–119. (In Russ.) Available at: https://giab-online.ru/files/Data/2015/05/113_119.pdf
5. Gabov V.V., Shefner A.D., Shishlyannikov D.I., Chekmasov N.V. A test bench for experimental studies of potash ore cutting with a single cutter of a mining machine. *Journal of Mining Institute*. 2012;195:245–248. (In Russ.)
6. Kuznetsova V.N. Physical modeling of the contact interaction between working body of digging machine and frozen soil. *Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics*. 2019;(61):70–81. (In Russ.) <https://doi.org/10.17223/19988621/61/7>
7. Sachuk A.Yu. *Justification of technological parameters selection for a static-type ripper when working with frozen soils* [-Cand. Sci. (Eng.) diss.]. Omsk; 2007. 186 p. (In Russ.)
8. Balovnev V.I. *Modeling of the interaction processes between the medium and the cutting tools of road-building machines*. Moscow: Vysshaya shkola; 1981. 335 p. (In Russ.)
9. Cheban A.Yu. Experimental study of rock disintegration with milling cutters of the working body. *Vestnik Tikhookeanskogo Gosudarstvennogo Universiteta*. 2012;(1):125–128. (In Russ.) Available at: <https://pnu.edu.ru/vestnik/pub/articles/1663/>

Информация об авторах

Панишев Сергей Викторович – ведущий научный сотрудник, Институт горного дела Севера им. Н.В. Черского Сибирского отделения Российской академии наук, г. Якутск, Российская Федерация; e-mail: bsdpsv@mail.ru

Алькова Елена Леонидовна – старший научный сотрудник, Институт горного дела Севера им. Н.В. Черского Сибирского отделения Российской академии наук, г. Якутск, Российская Федерация; e-mail: Nelealc12@rambler.ru

Максимов Михаил Савич – младший научный сотрудник, Институт горного дела Севера им. Н.В. Черского Сибирского отделения Российской академии наук, г. Якутск, Российская Федерация; e-mail: mexes_07@mail.ru

Хосоев Доржо Владимирович – ведущий инженер, Институт горного дела Севера им. Н.В. Черского Сибирского отделения российской академии наук, г. Якутск, Российская Федерация; e-mail: hosoev70@mail.ru

Information about the authors

Sergey V. Panishev – Leading Researcher, Institute of Mining of the North named after N.V. Chersky, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russian Federation; e-mail: bsdpsv@mail.ru

Elena L. Alkova – Senior Research Fellow, Institute of Mining of the North. N.V. Chersky, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russian Federation; e-mail: Nelealc12@rambler.ru

Mikhail S. Maksimov – Junior Researcher, Institute of Mining of the North named after N.V. Chersky, Siberian Branch of the Russian Academy of Science, Yakutsk, Russian Federation; e-mail: mexes_07@mail.ru

Dorzho V. Hosoev – Leading Engineer, Institute of Mining of the North N.V. Cherskiy, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russian Federation; e-mail: hosoev70@mail.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию: 30.09.2023

Поступила после рецензирования: 24.10.2023

Принята к публикации: 02.11.2023

Article info

Received: 30.09.2023

Revised: 24.10.2023

Accepted: 02.11.2023