

СПОСОБ ПОДГОТОВКИ К ВЫЕМКЕ СЕЗОННО ПРОМЕРЗШИХ УСТУПОВ И ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ЕГО ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ

Чебан А.Ю.

Институт горного дела ДВО РАН, Хабаровск, Россия

Аннотация. Актуальность и цель исследования. В настоящее время в России происходит формированию новых центров добычи угля с постепенным смещением угледобычи в восточную часть страны. Повышение требований к обеспечению экологической и промышленной безопасности горных работ при сохранении приемлемого уровня экономической эффективности производства предопределяет необходимость изыскания новых геотехнологических решений, оптимизации параметров горных работ и оборудования, техники и технологий. Вскрышные породы многих дальневосточных угольных разрезов представлены мелкозернистыми наносными породами, которые в талом состоянии легко разрабатываются карьерными экскаваторами, однако в холодное время года при промерзании их прочность и сопротивление выемке многократно возрастают, что приводит к необходимости применения буровзрывных работ. Известны различные способы и оборудование для механического разрушения мерзлоты, однако при значительной глубине промерзания откосов уступов возникают проблемы с их безвзрывной подготовкой к выемке. **Цель работы.** Создание эффективного и компактного сменного рабочего оборудования для гидравлического экскаватора, обеспечивающего возможность ослабления массива промерзшего на глубину до 2,0–2,5 м щелями, при этом конструктивная схема машины должна обеспечивать возможность нарезания щелей в откосах уступов с криволинейной поверхностью. **Результаты.** В статье предлагается усовершенствованная схема ослабления поверхности промерзших уступов с применением гидравлического экскаватора с комбинированным сменным рабочим оборудованием, включающим фрезу, термоторелку и рыхлитель. Разупрочнение сезонно промерзшего поверхностного слоя уступа ведется путем нарезания щелей, которое производится на всю глубину промерзания, при этом разупрочнение откоса осуществляется наклонными щелями, а разупрочнение рабочей площадки – горизонтальными щелями вдоль уступа. Первоначально щель нарезает фреза. В случае если глубина промерзшего слоя превышает глубину щели, нарезанной фрезой, то посредством термоторелки производится термическое воздействие на оставшийся промерзшим слой, в результате которого происходит оттаивание мерзлоты, после чего рыхлитель прорезает углубочную щель в оттаявшей породе, что обеспечивает разупрочнение промерзшего слоя на всю глубину. **Выводы.** Предлагаемые способ и оборудование для подготовки к выемке сезонно промерзших уступов позволяют упростить технологический процесс ведения открытых горных работ в зимнее время, снизить себестоимость добычи полезного ископаемого и уменьшить отрицательное воздействие на окружающую среду.

Ключевые слова: вскрышные работы, откос уступа, мерзлота, нарезание щелей, гидравлический экскаватор, фрезерный рабочий орган, термоторелка.

Введение

Горнодобывающая промышленность является важной составляющей экономики большинства регионов Дальнего Востока, на территории которых ведется освоение месторождений золота, серебра, платины, алмазов, бурого и каменного угля, черных и цветных металлов, а также других полезных ископаемых. Разработка угольных месторождений ведется практически во всех регионах Дальнего Востока – в Амурской, Сахалинской, Магаданской и Чукотской областях, Хабаровском и Приморском краях, Республике Саха (Якутия) [1–2]. В 2016 году добычу угля в Дальневосточном федеральном округе осуществляли 35 угольных компаний и организаций [3]. Основным направлением поставок угля на Дальнем Востоке в настоя-

щее время остаются электростанции, однако существенно выросла доля угля, идущего на экспорт. В соответствии с принятыми в «Программе развития угольной промышленности России на период до 2030 г.» целями по формированию новых центров добычи угля происходит постепенное смещение угледобычи в восточном направлении страны. При этом планируется, что доля Восточной Сибири в добыче угля возрастет с 23,7 до 34,0%, а Дальнего Востока – с 9,7 до 15,2% [4].

Добыча угля в Дальневосточном регионе осуществляется преимущественно открытым способом. С развитием промышленности и ростом ее потребности в полезных ископаемых открытым способом, ввиду его масштабности, стал для альтернативного подземного, по сути, недостижимым как по фактору производственной мощности горных предприятий, условиям обеспечения без-

опасности горных работ, так и по показателям инвестиционной привлекательности [5–6]. Повышение требований к обеспечению экологической и промышленной безопасности горных работ при сохранении приемлемого уровня экономической эффективности производства предопределяют необходимость изыскания новых геотехнологических решений, оптимизации параметров горных работ и оборудования, техники и технологий с учетом принципов рационального сочетания различных ресурсосберегающих, малоотходных и ресурсовоспроизводящих процессов открытых горных работ [7–9]. Развитие технических средств позволяет вести на месторождениях безвзрывную выемку все более прочных горных пород [10–12].

Постановка проблемы

Вскрышные породы Еркевещкого, Лучегорского, Райчихинского и некоторых других дальневосточных угольных разрезов представлены глинами, суглинками или супесями. Данные мелкозернистые наносные породы относятся к мягким породам и в талом состоянии легко разрабатываются одноковшовыми карьерными экскаваторами, однако в холодное время года при промерзании их прочность и сопротивление выемке многократно возрастают, что приводит к значительным сложностям при ведении вскрышных работ. В ноябре месяце при небольшой глубине промерзания (до 0,5–0,7 м) карьерные экскаваторы, осуществляющие вскрышные работы, достаточно успешно «взламывают» промерзший откос непосредственно рабочим оборудованием, однако при этом на агрегаты и металлоконструкцию экскаватора воздействуют значительные динамические нагрузки, что может привести к его поломке, особенно в условиях низких температур. В связи с этим с декабря месяца при глубине промерзания более 0,7 м начинается подготовка вскрышных пород к выемке с применением буровзрывного способа. Применение взрывания усложняет технологический процесс ведения открытых горных работ, значительно повышает себестоимость добычи полезного ископаемого, ведет к простоям выемочной техники и оказывает отрицательное влияние на окружающую среду, а также имеет ряд других недостатков. Для исключения буровзрывной подготовки из технологического процесса открытых горных работ предлагаются новые и совершенствуются известные способы безвзрывной подготовки сезонно мерзлых пород к выемке. Промерзший слой рабочих площадок уступов возможно эффективно разрушать с помощью рыхлителей на базе тяжелых гусеничных

тракторов [13], однако данные машины не обеспечивают возможности рыхления откосов уступов. Откосы промерзших уступов возможно рыхлить с применением гидравлических строительных экскаваторов, оборудованных ковшами с рыхлящими зубьями на днище или дополнительными выдвижными зубьями [14], однако при увеличении глубины промерзания горных пород более 0,7 м данный тип оборудования становится малоэффективным. Способ разрезания мерзлого грунта [15] посредством базовой машины, оборудованной фрезой, на которой между зубьями установлены термогорелки, может быть использован в горном деле и строительстве для нарезания щелей в промерзшем массиве и разделения его на отдельные части перед выемкой, однако данное оборудование не позволяет вести нарезание щелей в откосах уступов.

Известен способ разупрочнения промерзших уступов на угольном разрезе с применением бурового станка и роторного траншейного экскаватора [16]. Так, при максимальной глубине промерзания пород в феврале-марте, равной 2,0–2,5 м, буровым станком обеспечивается бурение скважин, параллельных откосу уступа (под углом примерно 70°), по 3–4 скважины в ряд на всю высоту уступа с оставлением между скважинами промежутков мерзлоты, которые ковш карьерного экскаватора может выломать. Расстояние между рядами скважин принимается исходя из геометрических размеров ковша карьерного экскаватора. После работы бурового станка роторным траншейным экскаватором на рабочей площадке уступа осуществляется копание продольных траншей шириной 1,2 м на глубину промерзания с перемычками в 1 м, с одновременной засыпкой траншей вынудой горной массой для предохранения массива от дальнейшего промерзания. Таким образом, подготавливается к выемке участок уступа длиной примерно равной сменной производительности карьерного экскаватора. Недостатком способа является оставление в промерзшем откосе уступа промежутков между скважинами, в процессе разрушения которых в металлоконструкции карьерного экскаватора будут возникать значительные перегрузки, что может привести к его поломке. Также необходимо отметить, что в большинстве случаев откосы уступа имеют не прямолинейную, а криволинейную форму, повторяющую траекторию движения ковша экскаватора, а ослабление откоса уступа буровыми скважинами предполагает наличие у него исключительно прямолинейной поверхности.

Для ослабления путем нарезания щелей откосов уступов как прямолинейной, так и криволи-

нейной формы, а также рабочих площадок уступов возможно использование специального рабочего оборудования гидравлического экскаватора, которое включает поворотную платформу, связанную с ней консольную телескопическую стрелу, включающую корневую, промежуточную и головную секции [17]. На головной секции установлен фрезерный рабочий орган. С целью снижения металлоемкости оборудования, предназначенного для ослабления щелями откоса уступа на всю глубину промерзания (до 2,0–2,5 м), рабочий орган выполнен составным, включающим основную и дополнительную фрезы. Основная (широкая) фреза прорезает щель вдоль поверхности откоса уступа, а дополнительная (узкая) фреза, установленная за основной фрезой и располагающаяся в открытой ею широкой щели, прорезает узкую щель на всю глубину промерзания уступа. Недостатками данного оборудования является его сложность, громоздкость, высокая стоимость и металлоемкость, невозможность использования данного экскаватора для выполнения других работ, а также необходимость применения основной фрезы значительной ширины для размещения в отфрезерованной ею щели дополнительной фрезы с приводом вращения.

Целью работы является создание эффективного и компактного сменного рабочего оборудования для гидравлического экскаватора, обеспечивающего возможность ослабления массива промерзшего на глубину до 2,0–2,5 м щелями. При этом конструктивная схема машины должна обеспечивать возможность нарезания щелей в откосах уступов как с прямолинейной, так и с криволинейной поверхностью.

Результаты исследований и их обсуждение

Институтом горного дела ДВО РАН предлагается усовершенствованная схема ослабления поверхности промерзших уступов с применением гидравлического экскаватора 1 с комбинированным сменным рабочим оборудованием 2 (см. рисунок). Комбинированное сменное рабочее оборудование 2 включает фрезу 3, термоторелку 4 и рыхлитель 5, установленные на раме 6. Фреза 3 имеет вращательное зацепление 7 относительно рамы 6, что обеспечивает значительную глубину прорезаемых щелей при относительно небольшом диаметре фрезы (для дискофрезерных рабочих органов с вращательным зацеплением глубина прорезаемой щели определяется по зависимости $H=(0,65-0,67)D$, где D – диаметр фрезы). Рыхлитель 5 шарнирно закреплен на раме 6 и управляется посредством гидроцилиндра 8. Рама 6 шар-

нирно закреплена на рукояти 9 и может поворачиваться в вертикальной плоскости посредством гидроцилиндра 10.

Разупрочнение сезонно промерзшего поверхностного слоя 11 уступа 12 ведется горизонтальными и наклонными щелями 13, 14. Нарезание щелей 13, 14 производится на всю глубину 15 промерзания и включает разупрочнение откоса 16 по криволинейной траектории наклонными щелями 14, разупрочнение промерзшего слоя 11 породы рабочей площадки 17 осуществляется вдоль уступа 12 путем формирования параллельно друг другу горизонтальных щелей 13. При нарезании щелей формируются пережки 18 между наклонными щелями 14 и между горизонтальными щелями 13 размером менее ширины ковша 19 карьерного экскаватора. Нарезание наклонных щелей 14 в промерзшем слое 11 посредством фрезы 3 начинается с верхней части откоса 16 уступа 12 (см. рисунок). В процессе нарезания щели 14 стрела и рукоять 9 гидравлического экскаватора 1 постепенно опускаются, при этом фрезерование осуществляется по необходимой криволинейной траектории. В случае если глубина 15 промерзшего слоя 11 превышает глубину щели, нарезанной фрезой 3, то посредством термоторелки 4, установленной за фрезой 3, производится термическое воздействие на оставшийся промерзшим слой 20, в результате которого происходит оттаивание мерзлоты. За термоторелкой 4 установлен рыхлитель 5, имеющий меньшую ширину, чем фреза 3, заглубление рыхлителя 5 осуществляется гидроцилиндром 8. Рыхлитель прорезает углубочную щель 21 в оттаявшей породе, что обеспечивает разупрочнение промерзшего слоя на всю глубину 15.

В результате разупрочнения промерзших поверхностей уступа за счет нарезания щелей появляется возможность разработки вскрышных пород карьерным экскаватором 19 без проведения взрыва. При необходимости сменное комбинированное оборудование гидравлического экскаватора быстро заменяется на ковш, и экскаватор может быть использован по прямому назначению – для выемки горных пород.

Заключение

Безвзрывная подготовка промерзших пород к выемке позволяет упростить технологический процесс ведения открытых горных работ, снизить себестоимость добычи полезного ископаемого, уменьшить отрицательное воздействие на окружающую среду. Механическое разупрочнение мерзлоты позволит увеличить производитель-

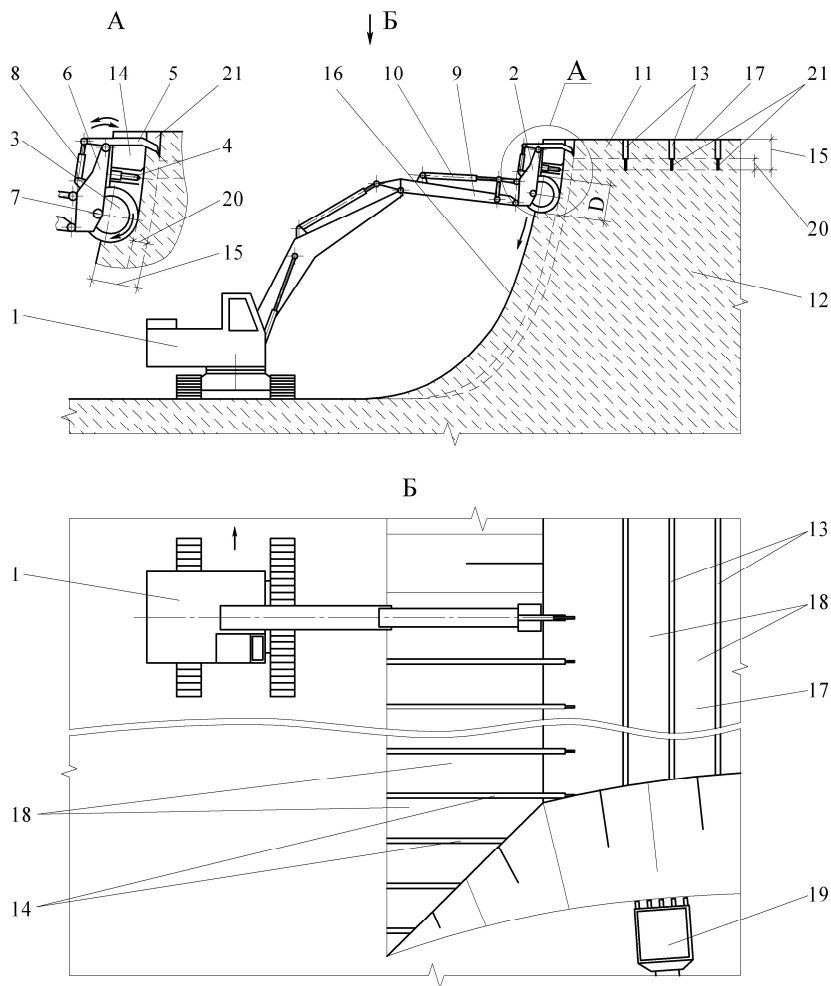


Схема разупрочнения сезонно промерзших поверхностей уступа гидравлическим экскаватором с комбинированным сменным рабочим оборудованием

ность горного оборудования, задействованного на вскрышных работах, поскольку не потребуются его отвода на безопасное расстояние, как в случае ведения взрывных работ. Предлагаемое комбинированное сменное рабочее оборудование гидравлического экскаватора для подготовки сезонно промерзших пород на глубину до 2,0–2,5 м к вы-

емке имеет значительно меньшие габариты, металлоемкость и стоимость в сравнении с известными конструкциями оборудования или комплектами машин для разупрочнения промерзших откосов. Кроме того, данное оборудование позволяет нарезать экскаватору щели в криволинейных поверхностях откосов уступов, а также обеспечи-

васт возможность быстрой его замены на ковш или другое сменное оборудование.

Список литературы

1. Плакитина Л.С. Современное состояние и перспективы развития добычи в период до 2030 г. в основных бассейнах и месторождениях, расположенных в Дальневосточном ФО // Горная промышленность. 2014. № 1. С. 12–20.
2. Чебан А.Ю. Выемочная техника, задействованная на угольных разрезах в южной части Дальневосточного региона // Вестник Тихоокеанского государственного университета. 2013. № 3. С. 081–084.
3. Плакитин Ю.А., Плакитина Л.С., Дьяченко К.И. Анализ развития угольной промышленности в Дальневосточном федеральном округе в 2000–2015 гг. // Горный журнал. 2017. № 2. С. 12–16.
4. Байсаров Р.С. Проблемы и перспективы реализации приоритетных проектов освоения угольных месторождений Восточной Сибири и Дальнего Востока // Горная промышленность. 2016. № 2. С. 20–25.
5. Трубецкой К.Н. Решение проблем экологически сбалансированного освоения месторождений открытыми геотехнологиями // Горный журнал. 2018. № 6. С. 71–76.
6. Starke L. Breaking New Ground: Mining, Minerals and Sustainable Development. London: IIED, 2016, 480 p.
7. Чебан А.Ю. Совершенствование безвзрывных циклично-поточных технологий добычи полезных ископаемых // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2016. Т. 14. № 2. С. 5–9.
8. Frank U. Multi-perspective enterprise modeling: foundational concepts, prospects and future research challenges. Software & Systems Modeling. 2014, vol. 13, no. 3, pp. 941–962.
9. Василец В.Н., Лапаев В.Н., Пикалов В.А. Проблемы повышения объемов и эффективности производства на разрезе «Заречный» в условиях открыто-подземной разработки // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2015. № 1. С. 9–15.
10. Чебан А.Ю. Селективная разработка Эльгинского угольного месторождения с применением выемочно-сортировочного комплекса // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2017. № 4. С. 247–254.
11. Хютянов Е.А., Гаврилов В.П. Повышение полноты извлечения запасов сложноструктурных пластов с учетом зольности угля в приконтактных зонах // Вестник Забайкальского государственного университета. 2016. Т. 22. № 10. С. 20–28.
12. Шемякин С.А., Матвеев Д.Н., Чебан А.Ю. Экономическое обоснование эффективности безвзрывной селективной выемки полезного ископаемого и вмещающих пород с использованием технико-технологических комплексов на основе фрезерных комбайнов // Горный журнал. 2015. № 2. С. 43–46.
13. Анистратов Ю.И., Анистратов К.Ю., Щадов М.И. Справочник по открытым горным работам. М.: НТЦ «Горное дело», 2010. 700 с.
14. Шемякин С.А., Домнин Ю.В., Крадинов И.С. Ковши одноковшовых гидравлических экскаваторов для разработки мерзлого грунта // Строительные и дорожные машины. 1982. № 8. С. 4–6.
15. Пат. 2316631 Российская Федерация, МПК E02F5/02 E02F5/30. Способ разрезания мерзлого грунта / А.С. Шаволов, А.Д. Савчук; заявитель и патентообладатель Военный инженерно-технический университет. № 2006128825/03; заявл. 08.08.2006; опубл. 10.02.2008.
16. Мамаев Ю.А., Шемякин С.А. Безвзрывная технология вскрышных работ в зимний период // Горный журнал. 2001. № 8. С. 24–26.
17. Пат. 2380487 Российская Федерация, МПК E02F3/28 E02F5/08. Рабочее оборудование гидравлического экскаватора / С.А. Шемякин, А.Ю. Чебан, И.Б. Ковалев; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО Тихоокеанский государственный университет. № 2008126965/03; заявл. 02.07.2008; опубл. 27.01.2010.

Поступила 23.10.18

Принята в печать 10.01.19

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

<https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-2-11-16>

PREPARATION OF SEASONALLY FROZEN SCARP SLOPES FOR EXCAVATION AND THE RELEVANT EQUIPMENT

Anton Yu. Cheban – PhD (Eng.), Senior Researcher

Institute of Mining, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Khabarovsk, Russia.

E-mail: chebanay@mail.ru

Abstract. Relevance and Objectives. Russia is currently witnessing emergence of new coal production centers with a gradual shift toward the eastern part of the country. Stricter environmental and industrial safety regulations, as well as the need to maintain an acceptable level of cost effectiveness in the mining production, determine the need for new technical solutions and optimization of min-

ing operations, equipment and technology. The overburden of many coal mines situated in the Far East is represented by fine-grained mantle rock, which can be easily developed by open-pit excavators when thawed. However, during the freezing season, its strength and resistance to excavation multiply, which creates a need for drilling and blasting operations. There exist various methods and

equipment for the mechanical destruction of permafrost. However, when the frost penetration is quite deep in the scarp slopes, it may be difficult to prepare them for excavation without using explosives. **Objectives.** To design/build an efficient and compact spare equipment for a hydraulic excavator, so that it could be used to weaken the rock with the frost depth of 2.0–2.5 m by cutting slits. At the same time the machine should be designed the way to be able to cut slits in scarp slopes with curved surfaces.

Findings. The paper proposes an improved scheme for weakening the surface of frozen scarp slopes using a hydraulic excavator with a combination replaceable equipment, which include a milling cutter, a thermal burner and a ripper. The frozen surface layer of a scarp slope can be weakened by cutting slits to the full depth of the frozen layer. Inclined slits are used for weakening the scarp slope, and horizontal slits made along the scarp slope are used for weakening the working platform. The initial slit is made with a cutter, and if the frozen layer goes deeper than the slit made with the cutter, a thermal burner is used to produce a thermal impact on the remaining frozen layer, which helps to thaw out the frozen ground. After that the ripper cuts through the thawed rock, thus weakening the frozen layer all the way through. **Findings.** The proposed technique and equipment for preparing the frozen scarp slopes for excavation help optimise the open mining operations in the winter time, bring down the mining cost and lessen the environmental impact.

Keywords: Overburden works, scarp slope, permafrost, slitting, hydraulic excavator, milling tool, thermal burner.

References

- Plakitina L.S. Current status and prospective development of coal production till 2030 at the main coal fields of the Far Eastern Federal District. *Gornaya promyshlennost* [Mining industry], 2014, no. 1, pp. 12–20. (In Russ.)
- Cheban A.Yu. The Extraction Technique Used in Coal Mines in the Southern Part of the Far-East Region]. *Vestnik Tihookeanskogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletin of Pacific State University], 2013, no. 3, pp. 081–084. (In Russ.)
- Plakitin Yu.A., Plakitina L.S., Dyachenko K.I. Overview of the coal industry in the Far Eastern Federal District in 2000–2015. *Gornyy zhurnal* [Mining journal], 2017, no. 2, pp. 12–16. (In Russ.)
- Baysarov R.S. Implementation of the priority projects on the development of Eastern Siberia and Far Eastern coal deposits: Problems and prospects. *Gornaya promyshlennost* [Mining industry], 2016, no. 2, pp. 20–25. (In Russ.)
- Trubetskoy K.N. Finding solutions for sustainable development of deposits using open geotechnologies. *Gornyy zhurnal* [Mining journal], 2018, no. 6, pp. 71–76. (In Russ.)
- Starke L. Breaking New Ground: Mining, Minerals and Sustainable Development. London: IIED, 2016. 480 p.
- Cheban A.Yu. Enhancing the conveying technology in explosive-free mining. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2016, vol. 14, no. 2, pp. 5–9. (In Russ.)
- Frank U. Multi-perspective enterprise modeling: foundational concepts, prospects and future research challenges. *Software & Systems Modeling*. 2014, vol. 13, no. 3, pp. 941–962.
- Vasilets V.N., Lapaev V.N., Pikalov V.A. The problems of increasing the output and production efficiency at the Zarechny pit where a combination opencast and underground mining is used. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2015, no. 1, pp. 9–15. (In Russ.)
- Cheban A.Yu. Selective development of the Elginsk coal deposit using an excavation and screening complex. *Izvestiya Tulskego gosudarstvennogo universiteta. Nauki o Zemle* [Bulletin of the Tula State University. Earth Sciences], 2017, no. 4, pp. 247–254. (In Russ.)
- Khoyutyanov E.A., Gavrilov V.L. On raising the recovery rate while taking into account the ash content of coal in the contact zones of complex structure seams. *Vestnik Zabaykalskogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletin of the Zabaykale State University], 2016, vol. 22, no. 10, pp. 20–28. (In Russ.)
- Shemyakin S.A., Matveev D.N., Cheban A.Yu. Explosive-free selective extraction of minerals and host rock using surface miner technology: Feasibility study. *Gornyy zhurnal* [Mining journal], 2015, no. 2, pp. 43–46. (In Russ.)
- Anistratov Yu.I., Anistratov K.Yu., Shchadov M.I. *Spravochnik po otkrytym gornym rabotam* [Handbook of open pit mining]. Moscow: Gornoe delo, 2010. 700 p. (In Russ.)
- Shemyakin S.A., Domin Yu.V., Kradinov I.S. Buckets of hydraulic shovels designed for the development of frozen soil. *Stroitelnye i dorozhnye mashiny* [Construction and road machinery], 1982, no. 8, pp. 4–6. (In Russ.)
- Shavolov A.S., Savchuk A.D. *Sposob razrezaniya merzlogo grunta* [The method of cutting frozen soil]. Patent RF, no. 2316631, 2008.
- Mamaev Yu.A., Shemyakin S.A. Explosive-free technology of overburden operations in the winter time. *Gornyy zhurnal* [Mining journal], 2001, no. 8, pp. 24–26. (In Russ.)
- Shemyakin S.A., Cheban A.Yu., Kovalev I.B. *Rabochee oborudovanie gidravlicheskogo ekskavatora* [Working equipment of hydraulic excavator]. Patent RF, no. 2380487, 2010.

Received 23/10/18

Accepted 10/01/19

Образцы для цитирования

Чебан А.Ю. Способ подготовки к выемке сезонно промерзших уступов и оборудование для его осуществления // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2019. Т.17. №2. С. 11–16. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-2-11-16>

For citation

Cheban A.Yu. Preparation of seasonally frozen scarp slopes for excavation and the relevant equipment. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2019, vol. 17, no. 2, pp. 11–16. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-2-11-16>