

ОБОСНОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ФРЕЗЕРНЫХ КОМБАЙНОВ СЕЛЕКТИВНОЙ ВЫЕМКИ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ УГОЛЬНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ В УСЛОВИЯХ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУР

М.М. Якубовский¹, Е.А. Михайлова¹, А.А. Бажуков¹

¹ Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия,
e-mail: elena_mikhailova96@mail.ru

Аннотация: Рассмотрена перспектива использования комбайнов селективного фрезерования для добычи угля в условиях вечной мерзлоты. Представлены результаты экспериментальных исследований прочностных характеристик проб каменного угля при раскалывании образцов неправильной формы встречно направленными сферическими инденторами с учетом влияния процессов предварительного замораживания в климатической камере. Условия проведения эксперимента: минимальная температура воздействия составляет -40 °С, максимальная $+23$ °С, относительная влажность — до 60%. Построены паспорта прочности угля при заданных условиях испытаний. Установлено, что при понижении температуры до критических значений (-20 °С и ниже), прочностные характеристики горной породы, такие как пределы прочности при одноосном растяжении σ_p и сжатии $\sigma_{сж}$, а также параметры паспорта прочности значительно возрастают. Получены зависимости производительности фрезерного комбайна серии SM фирмы Wirtgen от прочностных показателей исследуемого каменного угля при различных температурах окружающей среды (0 °С, -10 °С, -20 °С, -30 °С, -40 °С). На основании анализа графиков зависимости производительности оборудования от прочности разрабатываемых пород установлено, что снижение технической производительности фрезерного комбайна при разработке мерзлых пород может составить до 43,0%.

Ключевые слова: каменный уголь, паспорт прочности, коэффициент хрупкости, сферические инденторы, зона вечной мерзлоты, селективная выемка, производительность, фрезерный комбайн.

Для цитирования: Якубовский М. М., Михайлова Е. А., Бажуков А. А. Обоснование эффективности применения фрезерных комбайнов селективной выемки для разработки угольных месторождений в условиях низких температур // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 10. – С. 42–57. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_10_0_42.

Reasons of efficiency of surface miners in selective coal cutting under low temperatures

M.M. Yakubovskiy¹, E.A. Mikhailova¹, A.A. Bazhukov¹

¹ Saint-Petersburg Mining University, Saint-Petersburg, Russia,
e-mail: elena_mikhailova96@mail.ru

Abstract: The article discusses feasibility of selective coal cutting by surface miners under conditions of permafrost. The strength test data on splitting irregularly shaped coal samples by opposite-directed spherical indenters after preliminary freezing of the samples in a climate cell are presented. The testing conditions were: minimal and maximal treatment temperatures $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ and $+23\text{ }^{\circ}\text{C}$, respectively; relative humidity up to 60%. The coal failure envelopes are plotted. It is found that with decreasing temperature down to critical values ($-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ and lower), the ultimate uniaxial compression and tension strengths σ_{com} and σ_t , and the failure envelope parameters grow essentially. The capacity of Wirtigen SM surface miner is related with the strength characteristics of the test coal under different ambient temperatures ($0, -10\text{ }^{\circ}\text{C}, -20\text{ }^{\circ}\text{C}, -30\text{ }^{\circ}\text{C}, -40\text{ }^{\circ}\text{C}$). From the analysis of the resultant relationships, it follows that reduction in the surface miner capacity in frozen rock cutting can reach 43.0%.

Key words: coal, failure envelope, brittleness ratio, spherical indenters, permafrost zone, selective cutting, capacity, surface miner.

For citation: Yakubovskiy M. M., Mikhailova E. A., Mikhailova E. A., Bazhukov A. A. Reasons of efficiency of surface miners in selective coal cutting under low temperatures. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021;(10):42-57. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_10_0_42.

Введение

Значительная часть территории Российской Федерации охвачена сезонным промерзанием пород. Наибольшие значения (до 4,0–8,0 м) сезонного промерзания достигают в районах с холодным резко-континентальным климатом, что осложняет разработку месторождений полезных ископаемых, представленных рыхлыми и полускальными породами. Критически низкие температуры значительно влияют на увеличение механических нагрузок горнодобывающего оборудования.

Многообразие теплофизических, физико-химических и физико-механических процессов при промерзании горных пород является причиной существенных преобразований вещественного свойств, состава, текстуры и структуры [1]. Причем в различных горных породах процесс замораживания оказывает различное влияние на прочностные характеристики.

Так, эксперименты А.С. Курилко, Е.В. Захарова по замораживанию различных карбонатных пород показали су-

щественное снижение затрачиваемой на дробление энергии породы: при уменьшении температуры от комнатной ($+20\text{ }^{\circ}\text{C}$) до $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ – $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ снижение прочности в среднем составило 35,0%. При дальнейшем понижении температуры вплоть до $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ происходило постепенное увеличение прочности, причем для одних образцов прочность достигала значения, близкого к прочности при комнатной температуре, для других превышала последнюю на 64,0% [2].

Исследования С.А. Эпштейн, И.М. Никитиной, К.В. Агаркова, В.Г. Нестеровой, В.И. Минаева по циклическому замораживанию-размораживанию углей разных видов (бурый, каменный средней и высокой стадий метаморфизма) показали, что при выбранных условиях воздействия происходит изменение трещиновато-пористой структуры бурого и каменных углей. Анализ влияния температуры окружающей среды на энергоемкость разрушения бурого угля показал, что падение температуры с $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ приводит к снижению удельных энергозатрат на 30,0%, что объяс-

няется прекращением роста кристаллов льда поровой влаги в угле. При дальнейшем понижении температуры значение энергоемкости разрушения стремительно растет, и при температуре $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ показывает рост более чем на 50,0%, по сравнению с $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ [3].

Таким образом, выбор оборудования, приспособленного к работе в зонах вечной мерзлоты, является залогом успешной работы горнодобывающего предприятия. Целью работы является показать важность оценки климатических условий.

Отличительными особенностями залегающих в недрах арктической зоны угольных пластов являются их небольшая мощность (от 0,4 м), наличие прослоек пустых пород и пропластков, что приводит к значительному ухудшению качества сырья в процессе добычи и, вкупе со сложными климатическими условиями, — к повышению себестоимости полезного ископаемого. Кроме того, при ведении любой активной деятельности в условиях крайнего севера необходимо тщательно анализировать и просчитывать экологические риски.

Задачей настоящей статьи является установление влияния климатических условий на возможности фрезерного комбайна селективной выемки серии SM фирмы Wirtgen путем сравнения производительности данного комбайна при постепенном понижении температуры окружающей среды. Данное оборудование, благодаря известным преимуществам, широко используется в мире при разработке месторождений с различными горно-геологическими и горнотехническими условиями. Различные аспекты разработки месторождений с применением фрезерных комбайнов рассмотрены в различных зарубежных и отечественных исследованиях.

Авторами T. Bedkowski, Z. Kasztelawicz, M. Zajaczkowski, M. Sikora пред-

ставлен технико-экономический анализ процесса селективной добычи горных пород карьерным комбайном фирмы Wirtgen на основе эксплуатационных испытаний на месторождении известняка Raciszyn (Словакия); получены данные по производительности машины при различных режимах работы [4].

В статье А.А. Ординым, Е.Е. Швабенландом описаны результаты исследования по оценке рациональных параметров технологических схем работы комбайна Wirtgen при разработке Ошурковское месторождение апатитов (Респ. Бурятия), обоснованы зависимости производительности комбайна от условий и технологических факторов [5].

В работе Н. Volk отражены экономические аспекты эффективности открытой разработки с применением фрезерного оборудования [6].

В исследовании S. Kramadibrata, G.M. Simangunsong, N.P. Widodo, R.K. Wati-
timena, R.A. Tanjung, Y. Wicaksana сообщается о повышении эффективности работы комбайнов Wirtgen 2200-SM в известняковом карьере Palimanan (Индонезия) путем прогнозирования «режущей способности» данной горнодобывающей машины при различных скоростных режимах [7].

Анализ результатов многочисленных зарубежных исследований показывает, что рассматриваемые объекты недропользования располагаются, главным образом, в тропическом, субтропическом и умеренном климатических поясах, в то время как зона влияния Арктики остается не изученной в этой области.

Метод исследования

Для решения поставленной задачи в лаборатории физико-механических свойств и разрушения горных пород Научного центра геомеханики и проблем горного производства Санкт-Петербургского горного университета была

разработана методика экспериментальных исследований прочностных свойств горных пород под воздействием критических температур, проведены серии механических испытаний, направленных на оценку изменения прочностных характеристик каменных углей под воздействием отрицательных температур.

Разработанная методика исследований предусматривает отбор проб, подготовку образцов к испытаниям, проведение механических испытаний на раскалывание и обработку полученных экспериментальных данных применительно к расчетам производительности фрезерного комбайна селективной выемки серии SM фирмы Wirtgen в зависимости от температуры окружающей среды.

Определение прочностных свойств углей стандартными методами требует проведения многочисленных трудоемких испытаний образцов цилиндрической формы, качественное изготовление которых в достаточном количестве, как правило, весьма затруднено. Учитывая это, в качестве рабочего метода испытаний был выбран метод определения механических свойств горных пород и материалов по результатам испытаний образцов сферическими инденторами, разработанный в Санкт-Петербургском

горном университете В.А. Коршуновым [8–11].

Метод допускает использование образцов неправильной формы, что многократно упрощает отбор проб и подготовку образцов к испытаниям. Технически простая схема нагружения образцов соосными встречно направленными сферическими инденторами (рис. 1) позволяет существенно упростить испытания и делает их доступными как в лабораторных, так и в полевых условиях.

Для определения прочностных характеристик испытанных образцов был выбран расчетный метод построения полного паспорта прочности хрупкой горной породы, разработанный В.А. Коршуновым на основе уточненной схемы неоднородного напряженно-деформированного состояния образцов, которая описывает сложный вероятностный характер разрушения при его нагружении сферическими инденторами (квазипластичное поведение при предельно высоком уровне напряжений на контактах с инденторами, отрыв в плоскости нагружения и срез в промежуточных зонах) [8–11]. Стоит отметить, что метод очень информативен, так как позволяет определять полный комплекс прочностных характеристик каждого испытанного образца.

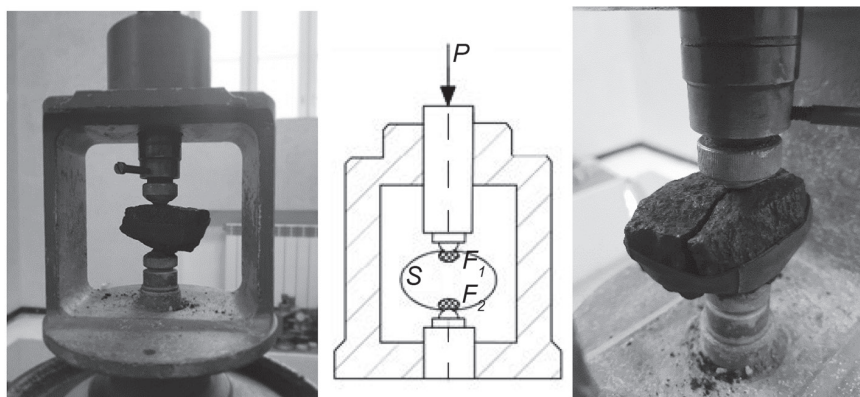


Рис. 1. Схема нагружения образца сферическими инденторами

Fig. 1. Diagram of sample loading by spherical indenters

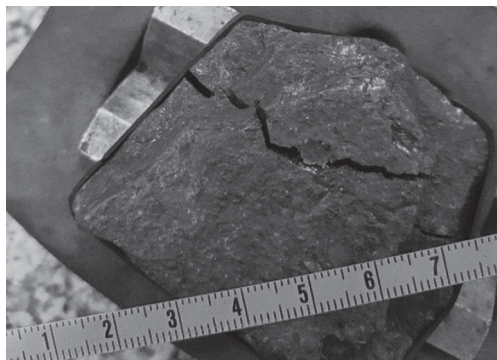


Рис. 2. Измерение геометрических параметров расколотого образца

Fig. 2. Change in geometry of split sample

Суть метода заключается в испытании образцов осевым усилием двух стальных шариков до раскалывания, фиксации разрушающей силы P (рис. 1) и измерению в расколотых образцах площади поверхности отрыва S и площади поверхностей зон разрушенной породы на контакте с инденторами F_1 и F_2 , из которых выбирали большую — F (рис. 2) [8].

Далее производилась оценка функциональных характеристик прочности, в качестве которых были приняты растягивающая σ_t и сжимающая p , составляющие величины предельного сопротивления срезу без нормальных напряжений C_0 . Значения пределов прочности при одноосном растяжении σ_p и сжатии $\sigma_{сж}$, максимального сопротивления срезу τ_{max} и параметров паспорта прочности — условного сцепления C и соответствующего угла внутреннего трения φ вычислялись по алгебраическим формулам [8–9].

Описание исследования

Данный подход был применен к образцам водонасыщенного, воздушно-сухого и естественного состояний при различных отметках пониженной температуры. При этом моделирование процессов водонасыщения и заморажива-

ния угля производилось на стадии подготовки образцов к механическим испытаниям.

При выборе режимов низкотемпературной обработки образцов были учтены данные климатических условий крупнейших угольных бассейнов, расположенных в районах Крайнего Севера Российской Федерации: Тунгусского, Таймырского, Печорского. А также угольный потенциал северных территорий Республики Саха (Якутия), недр Чукотского АО.

Испытанные образцы угля, общее количество которых 117 шт., были условно разделены на 3 группы и подготовлены к механическим испытаниям в соответствии с их моделируемым состоянием: воздушно-сухим, водонасыщенным и состоянием естественной влажности. В течение двух суток часть образцов угля насыщалась в дистиллированной воде. После извлечения, для того, чтобы удалить излишки воды, образцы протирались.

Для достижения образцами воздушно-сухого состояния в соответствии с ГОСТ 11014-2001 «Угли бурые, каменные, антрацит и горючие сланцы. Ускоренные методы определения влаги» высушивались в сушильном шкафу при температуре 50 °С в течение 8 ч. После окончания сушки уголь был охлажден на металлическом подносе, затем в эксикаторе. Каждый образец взвешивался на лабораторных весах до и после высушивания, благодаря этому была вычислена массовая доля влаги по потере массы.

В дальнейшем группы образцов в состоянии естественной влажности и насыщенные водой в течение 6 ч были подвержены заморозке в морозильной климатической камере при температурах: 0 °С, –10 °С, –20 °С, –30 °С, –40 °С. При этом свойства образцов в воздушно-сухом состоянии использовались в

качестве эталонных значений при оценке влияния процессов предварительно замораживания.

В качестве примера использования разработанного методического подхода при проведении экспериментальных исследований были изучены прочностные свойства негабаритных кусков угля марки Д (уголь каменный длиннопламенный, в соответствии с ГОСТ 25543-2013 «Угли бурые, каменные и антрациты. Классификация по генетическим и технологическим параметрам»), обладающего следующими основными характеристиками: текстура исследуемого угля – штриховатая; мелкие линзы витринита мощностью 1,0 мм, с густотой расположения через 1,0–5,0 мм; блеск исследуемого каменного угля – полублестящий; содержание золы – 15,0%; массовая доля влаги – 9,3%; массовая доля серы – 1,5%; плотность углей 1,2 г/см³; теплота сгорания – 24,28 МДж/кг; выход летучих веществ – 40,0%; содержание мелочи – 8,0%; крупность 10–56 мм. Пример исследуемого образца представлен на рис. 3.

В процессе проведения экспериментального исследования с образцами ка-

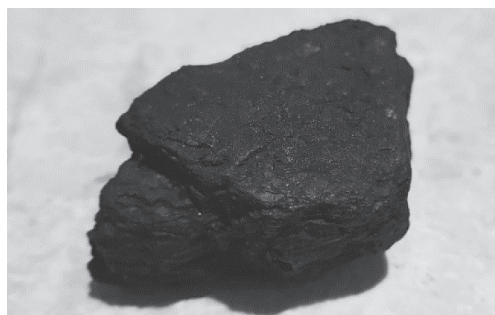


Рис. 3. Образец исследуемого каменного угля
Fig. 3. Test coal samples



Рис. 4. Образцы исследуемого каменного угля с сульфидными включениями
Fig. 4. Test coal samples with sulfide nodules

менного угля марки Д были замечены фракции с золотистыми прожилками халькопирита CuFeS₂ (рис. 4). Как известно, к одним из основных показателей качества угля относится наличие серы.

Таблица 1

Функциональные характеристики и расчетные параметры паспорта прочности угля в состоянии естественной влажности при различных отметках температуры
Adjustment functions and rated parameters of failure envelopes of coal having natural humidity under different temperatures

Параметры прочности	Температура					
	+23 °С	0 °С	-10 °С	-20 °С	-30 °С	-40 °С
σ_t , МПа	1,13	1,29	1,88	1,69	1,83	1,90
ρ , МПа	9,18	11,61	14,16	16,39	22,88	31,01
σ_p , МПа	2,01	2,32	3,27	3,30	3,35	3,55
C_0 , МПа	3,21	3,85	5,07	5,19	6,37	7,58
$\sigma_{сж}$, МПа	12,39	15,46	19,23	21,58	29,25	38,59
C , МПа	3,66	4,45	5,75	6,07	7,71	9,53
φ , град.	28,85	30,03	27,56	30,07	34,58	37,32
τ_{max} , МПа	17,68	24,36	28,42	38,85	73,95	127,35

Таблица 2

Функциональные характеристики и расчетные параметры паспорта прочности угля в водонасыщенном состоянии при различных отметках температуры
Adjustment functions and rated parameters of failure envelopes of coal saturated with water under different temperatures

Параметры прочности	Температура					
	+23 °C	0 °C	-10 °C	-20 °C	-30 °C	-40 °C
σ_t , МПа	1,23	1,25	1,49	2,08	1,62	1,78
ρ , МПа	9,49	11,27	18,23	18,42	23,71	29,79
σ_p , МПа	2,16	2,23	2,74	3,72	2,99	3,33
C_0 , МПа	3,39	3,73	5,17	6,14	6,01	7,10
$\sigma_{сж}$, МПа	12,89	15,01	23,39	24,57	29,72	36,89
C , МПа	3,85	4,32	6,23	7,09	7,74	8,99
φ , град.	28,38	30,03	34,21	29,91	36,27	36,41
τ_{max} , МПа	17,25	23,43	53,67	38,75	105,33	143,87

В процессе сжигания угля с прожилками халькопирита образуются химические соединения, которые реагируют с парами атмосферы, что способствует выделению серной кислоты. Таким образом, присутствие сульфидных включений в исследуемых образцах угля значительно снижает качество топлива.

Обработка и интерпретация результатов исследования

Результаты определения функциональных характеристик σ_t и ρ и расчет-

ных параметров паспорта прочности угля в состоянии естественной влажности и водонасыщенном состоянии при различных отметках температуры представлены в табл. 1 и 2.

Необходимо отметить, что значения пределов прочности при одноосном сжатии угля при неотрицательных температурах (0 °C и +23 °C), вычисленные по данным испытаний сферическими инденторами, согласуются со значениями коэффициента крепости по Протодьяконову (ГОСТ 21153.1-75 «Породы гор-

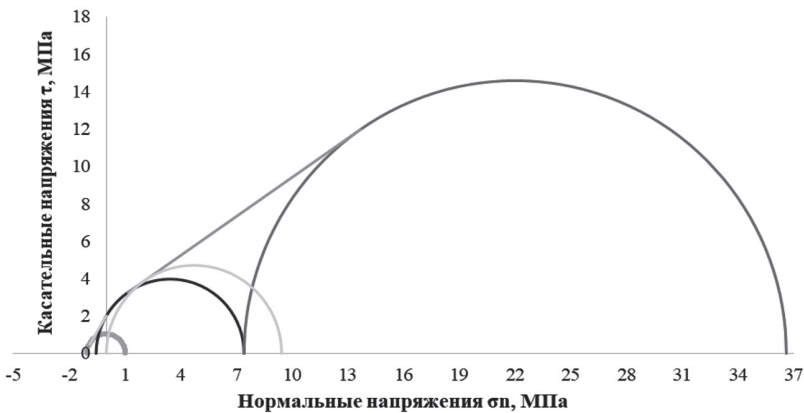


Рис. 5. Построение паспорта предельной прочности исследуемого угля в состоянии естественной влажности при температуре +23 °C

Fig. 5. Ultimate strength envelope of test coal having natural humidity under temperature of +23 °C

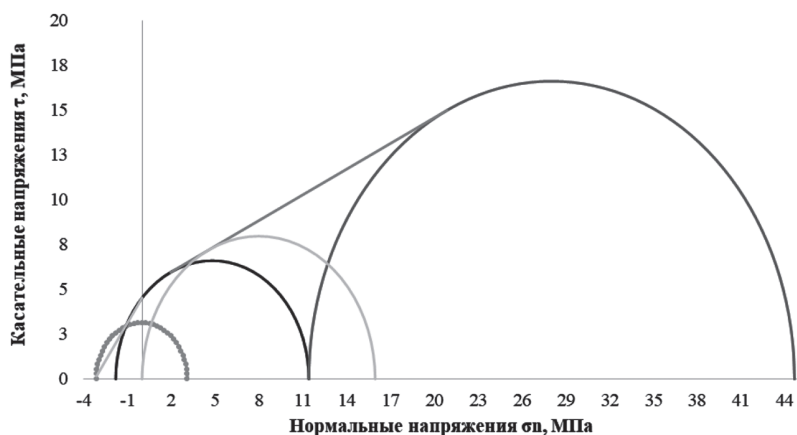


Рис. 6. Построение паспорта предельной прочности исследуемого угля в водонасыщенном состоянии при температуре +23 °С

Fig. 6. Ultimate strength envelope of test coal saturated with water under temperature of +23 °C

ные. Метод определения коэффициента крепости по Протодеяконову»), которые составили по данным А.А. Бажукова 1,5–1,7.

Примеры построения паспортов прочности образцов угля в состоянии естественной влажности и водонасыщенном состоянии представлены в координатах Мора на рис. 5 и 6. На рис. 5 и 6 приве-

дены наиболее характерные круги предельных напряжений Мора, соответствующие пределам прочности при растяжении (кручении) $\{-\sigma_p; \sigma_p\}$, при одноосном сжатии $\{0; \sigma_{сж}\}$, предельному сопротивлению при срезе без нормальных напряжений $\{-\sigma_t; p\}$ и максимальному сопротивлению срезу τ'_{max} при минимальном главном нормальном напряжении,

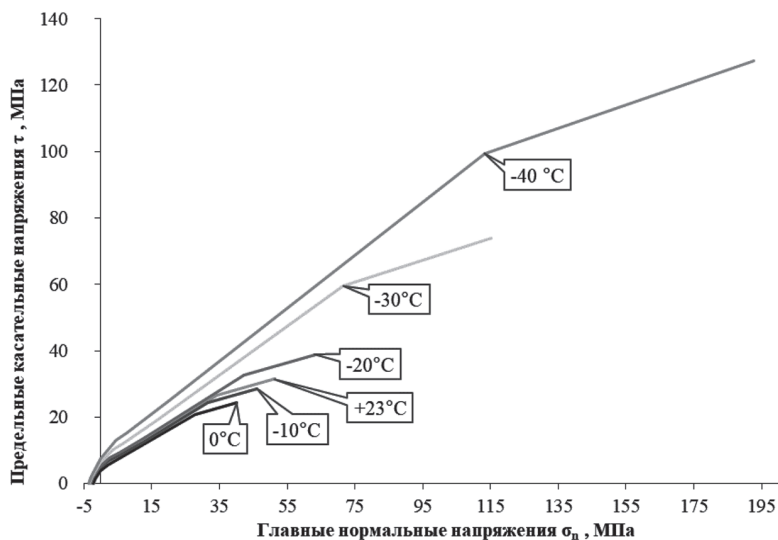


Рис. 7. Построение расчетного паспорта предельной прочности исследуемого угля в естественном состоянии при температурах +23 °С, 0 °С, -10 °С, -20 °С, -30 °С, -40 °С

Fig. 7. Ultimate strength envelope of test coal having natural humidity under temperature of +23 °C, 0 °C, -10 °C, -20 °C, -30 °C, -40 °C

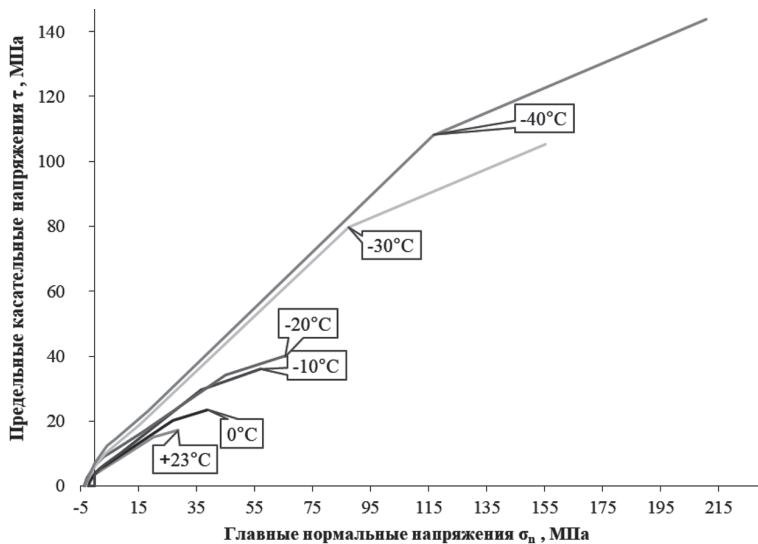


Рис. 8. Построение расчетного паспорта предельной прочности исследуемого угля в водонасыщенном состоянии при температурах +23 °С, 0 °С, -10 °С, -20 °С, -30 °С, -40 °С

Fig. 8. Ultimate strength envelope of test coal saturated with water under temperature of +23 °C, 0 °C, -10 °C, -20 °C, -30 °C, -40 °C

равном пределе прочности при одноосном сжатии, и огибающая их кривая.

Для обоснования определения параметров предельной прочности угля (до уровня максимального сопротивления срезу τ_{\max}) в условиях критических температур также были использованы паспорта прочности образцов угля в состоянии естественной влажности и водонасыщенном состоянии, представленные в координатах Хая (Heigh) (рис. 7, 8).

Известно, что значения углов внутреннего трения ϕ горных пород, как правило, принадлежат диапазону 20–60° и уменьшаются с повышением содержания в породе мелких фракций и минералов [12].

В настоящем исследовании значения углов внутреннего трения с понижением температуры увеличивались от 28,85° до 37,3° в образцах в состоянии естественной влажности и от 28,38° до 36,41° в водонасыщенных образцах. Вероятно, данный показатель увеличился в результате спаянности минеральных частиц льдом и содержания в поро-

де замерзшей воды, что препятствовало процессу скольжения в образцах угля.

Для приблизительной оценки критического значения растягивающего напряжения σ_p , при котором происходит разрушение породы, предложено использовать максимальную величину растягивающего напряжения, которой является величина предела прочности при всестороннем растяжении, формула (1):

$$\sigma_p = 2 \sigma_t \quad (1)$$

Путем оценки сдвиговых напряжений, которые соответствуют разрушению породы в условиях неравномерного трехосного сжатия, было определено еще одно предельное напряженное состояние в исследуемых образцах угля. В качестве предельного касательного напряжения вдоль поверхности контакта разрушенной породы была использована величина среднего давления p . За минимальное главное нормальное напряжение принята величина предельного сопротивления срезу C_0 — сцепление, которое соответствует расколу образцов.

Данное предельное напряженное состояние отображает круг Мора на графике нормальных и касательных напряжений, которые пересекают ось нормальных напряжений в точках C_0 и $(C_0 + 2p)$.

Для оценки критического значения одноосного сжимающего напряжения $\sigma_{сж}$, при котором происходит разрушение породы, была использована прямолинейность участка огибающей предельных кругов Мора для области трехосных сжимающих напряжений, формула (2):

$$\sigma_{сж} = p + C_0 \quad (2)$$

Необходимо отметить, что значение прочности на растяжение значительно ниже прочности на сжатие. Коэффициент хрупкости K_f , характеризующий данное отношение $\sigma_{сж} / \sigma_p$, показателен для сравнительной характеристики исследуемого угля в состоянии естественной влажности и водонасыщенном состоянии при разных отметках температуры, рис. 9.

Коэффициент K_f , выражающий также способность исследуемой породы (угля) разрушаться без значительных проявлений остаточных деформаций, характеризовался значениями от 7,88 до 11,6 для угля в состоянии естествен-

ной влажности и от 6,2 до 11,28 для угля в водонасыщенном состоянии. Таким образом, с понижением температуры угля повышалась его прочность и понижалась хрупкость.

Практическое применение

Физико-механические свойства разрабатываемой породы напрямую влияют на такие технические характеристики фрезерного комбайна, как производительность и износ резцов, от которых зависит эффективность применения безвзрывной технологии [13].

В приведенных графиках на рис. 10–12 выражена зависимость производительности карьерных комбайнов фирмы Wirtgen от предела прочности при одноосном сжатии при разных отметках температуры естественного и водонасыщенного состояния.

При отметках данного диапазона температур наблюдается существенное их влияние на упрочнение исследуемой горной породы. Производительность фрезерного комбайна серии SM фирмы Wirtgen в зависимости от прочностных характеристик замерзшей породы изменяется от 565 м³/ч при 38,59 МПа до 995 м³/ч при 12,39 МПа, в естественном состоянии и от 611 м³/ч при 36,89 МПа

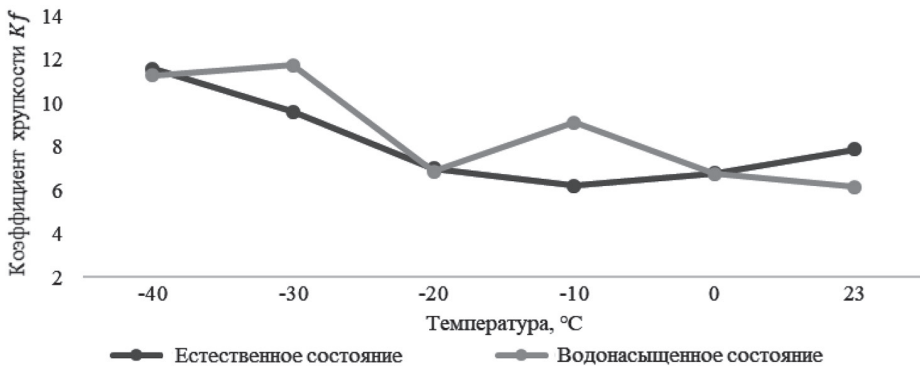


Рис. 9. Коэффициент хрупкости угля естественного и водонасыщенного состояния при температурах +23 °C, 0 °C, -10 °C, -20 °C, -30 °C, -40 °C

Fig. 9. Brittleness ratio of coal having natural humidity and when saturated with water under temperature of +23 °C, 0 °C, -10 °C, -20 °C, -30 °C, -40 °C

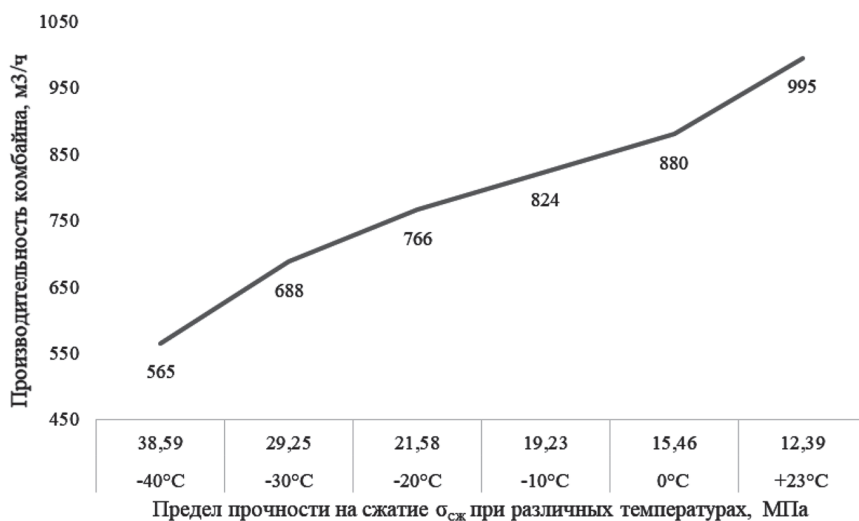


Рис. 10. Изменение предела прочности при сжатии образцов естественного состояния при +23 °С, 0 °С, -10 °С, -20 °С, -30 °С, -40 °С

Fig. 10. Variation in compression strength of samples having natural humidity under temperature of +23 °C, 0 °C, -10 °C, -20 °C, -30 °C, -40 °C

до 989 м³/ч при 12,89 МПа в водонасыщенном состоянии.

Таким образом, установлено, что, при понижении температуры прочностная характеристика исследуемого угля, одноосное сжатие $\sigma_{сж}$ возрастает. При

этом производительность фрезерного комбайна тем меньше, чем ниже температура и больше предел прочности на одноосное сжатие.

Производительность комбайна при разработке водонасыщенного исследуе-

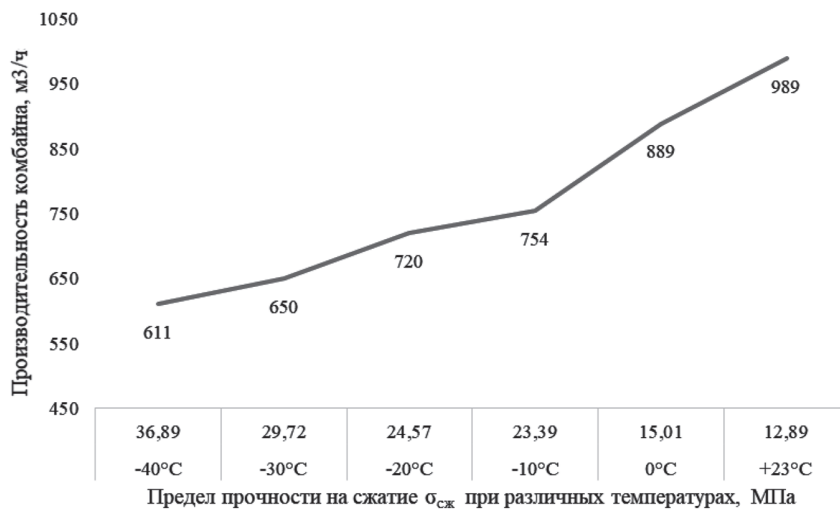


Рис. 11. Изменение предела прочности при сжатии образцов водонасыщенного состояния +23 °С, 0 °С, -10 °С, -20 °С, -30 °С, -40 °С

Fig. 11. Variation in compression strength of samples saturated with water under temperature of +23 °C, 0 °C, -10 °C, -20 °C, -30 °C, -40 °C

мого угля ниже, чем в угле естественно-го состояния. Данный факт объясняется тем, что понижение температуры сопровождается различными физическими и термохимическими превращениями. Увеличение прочности породы происходит вследствие того, что температура становится ниже температуры интенсивных фазовых переходов, приводя к уменьшению количества незамерзшей воды. Исходя из этого, при понижении температуры поровый лед цементирует и упрочняет породу, поэтому происходит увеличение нагрузки, затрачиваемой на разрушение при более низких температурах.

Стоит отметить, что при понижении температуры прочностная характеристика горных пород напрямую зависит от их минерального состава, а также степени водонасыщенности. Так, на рис. 12 при сравнении двух состояний исследуемого угля при постепенном понижении температуры в образцах водонасыщенного состояния можно наблюдать резкое, а затем плавное снижение производительности комбайна. Данное

явление объясняется тем, что криогенные преобразования в породах осуществляются при температурах от 0 °С до -2 °С. При дальнейшем снижении температуры они продолжают происходить, но с меньшей интенсивностью. Процесс завершается на отметках температуры от -15 °С до -20 °С.

Прочностные характеристики пород в начальной стадии промораживания напрямую зависят от наличия в образцах незамерзшей жидкой фазы. Именно существование участков незамерзшей фазы способствует снижению прочности пород. Однако данные участки могут выступать в роли ловушек, останавливающих распространение трещин, что приводит к дальнейшему увеличению прочности.

Как видно на рис. 12, на первой стадии промораживания (от +23 °С до 0 °С), содержание жидкой фазы которой невелико, исследуемый уголь обладает низкой прочностью. На второй стадии замораживания (от 0 °С до -10 °С), когда диффузный слой отсутствует, а жидкая фаза представлена тонкими слоями

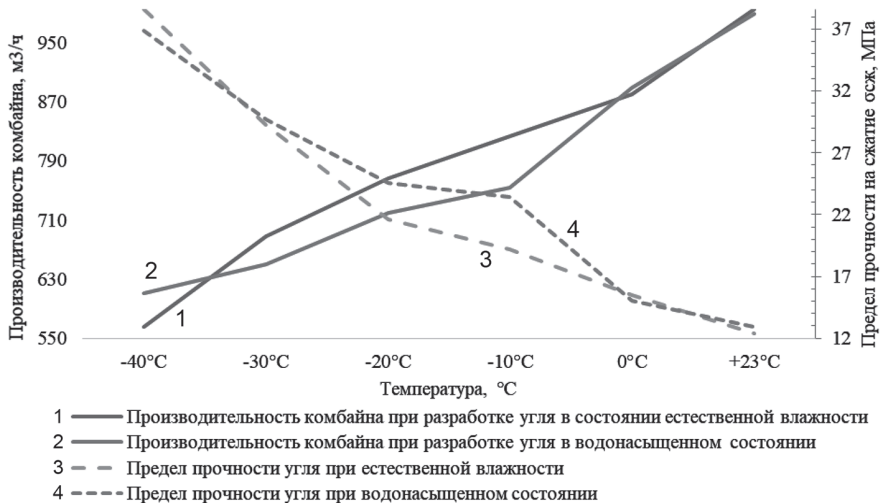


Рис. 12. Изменение предела прочности при сжатии образцов естественного и водонасыщенного состояний при +23 °С, 0 °С, -10 °С, -20 °С, -30 °С, -40 °С

Fig. 12. Variation in compression strength of samples having natural humidity and when saturated with water under temperature of +23 °С, 0 °С, -10 °С, -20 °С, -30 °С, -40 °С



Рис. 13. Добыча горной породы фрезерным комбайном

Fig. 13. Cutting with surface miner

прочносвязной воды, прочность на сжатие $\sigma_{сж}$ делает скачок в своем росте, а производительность комбайна резко падает. На третьей стадии замораживания (от $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$) жидкая фаза представлена разобщенными островками прочносвязной воды, способствующей максимальным значениям прочности породы и минимальной производительности комбайна. В этом случае хрупкость водонасыщенной породы возрастает, а прочность начинает уменьшаться. Это подтверждает рис. 9, где кривая коэффициента хрупкости K_f водонасыщенных образцов имеет скачкообразный характер, приводящий кривую в ниспадающее положение. Такое состояние кривой отображает, что хрупкость начинает преобладать над прочностью образцов, способствуя росту производительности комбайна.

Однако теория может значительно отличаться от практики. Разрушение мерзлых пород при резании фрезерным комбайном сопровождается их растеплением, что ведет к образованию вязкой и липкой субстанции и, соответственно, резкому снижению эффективности разработки. Таким образом, при разработке пород необходимо учитывать ее коэффициент водонасыщения (относительная доля заполнения пор водой в породе), который увеличивается в летне-весенний период при таянии льда и снега.

Полученные результаты подтверждаются эксплуатацией комбайна Wirtgen 2500 SM на карьере по добыче известняка предприятия АО «Пикалевский Цемент», рис. 13 [14].

В летний период средняя техническая производительность горнодобывающего оборудования составляла 316 – 322 т/ч, в зимний 81 – 89 т/ч. Не без внимания нужно оставлять тот факт, что, помимо температурных условий, на снижение производительности фрезерного комбайна оказывали такие факторы, как повышенная влажность пород и ограниченность свободного пространства.

Выводы

Вследствие трудоемкости проведения стандартных механических испытаний и проблематичности изготовления из исследуемого угля требуемого количества образцов цилиндрической формы в качестве рабочего метода испытаний был выбран косвенный метод определения механических свойств горных пород по результатам испытаний образцов произвольной формы сферическими инденторами, разработанный в Санкт-Петербургском горном университете В.А. Коршуновым.

На основании проведенных экспериментов и анализа графиков зависимости производительности оборудования от прочности разрабатываемых пород

установлено, что снижение технической производительности фрезерного комбайна при разработке мерзлых пород может составить до 43,0%. Такое значительное снижение производительности обуславливается тем, что межпоровый лед способствует упрочнению породы, что ведет к увеличению нагрузки, которая затрачивается на разрушение пород.

Полученные значения снижения производительности фрезерного комбайна могут отрицательно повлиять на оценку экономических и финансовых показателей предприятия. Поэтому принципиально важно учитывать климатическую зону, условия эксплуатации, производственную мощность предприятия и выбор соответствующей модели фрезерных комбайнов типа CSM — Continuous Surface Miner.

При этом необходимо понимать, что целью работы было показать важность оценки климатических условий. Значения производительности фрезерного комбайна для различных температур получены на основании косвенного анализа графиков производительности оборудования, имеющих в открытом доступе, и не учитывают особенности различных технологических схем ведения работ. Для получения точных данных необходимо проведение натурных экспериментов с технологическим оборудо-

ванием или, по крайней мере, моделирование процесса разработки пород фрезой.

Компенсировать возможное снижение производительности горнодобывающего оборудования позволяет селективная тонкослоевая технология разработки фрезерными комбайнами, наиболее полно удовлетворяющая аспектам ресурсосбережения: снижение потерь и засорения ценных коксующихся углей, сокращение объемов вскрышных работ, снижение экологической нагрузки на прилегающую территорию за счет исключения влияния буровзрывных работ. Важными задачами в данном случае являются: обоснование способов подготовки горных пород к выемке, порядка отработки месторождения с минимальными объемами вскрытых запасов полезного ископаемого, выбор скоростного режима работы оборудования.

М.М. Якубовский, Е.А. Михайлова, А.А. Бажуков выражают благодарность ведущему научному сотруднику лаборатории физико-механических свойств и разрушения горных пород Научного центра геомеханики и проблем горного производства Санкт-Петербургского горного университета В.А. Коршунову за вклад в проведение научного исследования и обработку результатов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Москалев А. Н., Пигида Е. Ю., Керекилица Л. Г., Вахалин Ю. Н. Разрушение горных пород при термоциклическом воздействии. — Киев: Наукова думка, 1987. — 250 с.
2. Курилко А. С., Захаров Е. В. Экспериментальные исследования влияния отрицательных температур на энергоемкость разрушения карбонатных пород // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2011. — № S10. — С. 154–162.
3. Эпштейн С. А., Никитина И. М., Агарков К. В., Нестерова В. Г., Минаев В. И. Влияние циклического замораживания-размораживания углей на показатели их качества // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2019. — № 6. — С. 5–18. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-06-0-5-18.
4. Będkowski T., Kasztelewicz Z., Sikora M. Technical and economic analysis of mechanical rock extraction based on 'Raciszyn' deposit // Inżynieria Mineralna. 2016, vol. 17, no. 2, pp. 107–112.

5. Ordin A. A. Schwabenland E. E. Evaluation of technological parameters for apatite extraction by surface miners // *Journal of Mining Science*. 2016, vol. 52, no. 2, pp. 293 – 299.

6. Volk H. Wirtgen drives the development of surface mining // *Procedia Engineering*. 2016, vol. 138, pp. 30 – 39.

7. Kramadibrata S., Simangunsong G. M., Widodo N. P., Wattimena R. K., Tanjung R. A., Wicaksana Y. Rock excavation by continuous surface miner in limestone quarry // *Geosystem Engineering*. 2015, vol. 18, no. 3, pp. 1 – 13.

8. Коршунов В. А., Петров Д. Н., Ястребова К. Н. Расчетный метод построения паспорта прочности горной породы по результатам испытаний образцов сферическими инденторами / Инновационные направления в проектировании горнодобывающих предприятий: геомеханическое обеспечение проектирования и сопровождения горных работ. VIII Международная научно-практическая конференция. Сборник научных трудов. – СПб.: СПбГУ, 2017. – С. 256 – 265.

9. Коршунов В. А., Карташов Ю. М. Новый способ определения предела прочности при растяжении горных пород // *Записки Горного института*. – 2011. – Т. 190. – С. 202 – 206.

10. Коршунов В. А., Карташов Ю. М., Козлов В. А. Определение показателей паспорта прочности горных пород методом разрушения образцов сферическими инденторами // *Записки Горного института*. – 2011. – Т. 185. – С. 41 – 45.

11. Павлович А. А., Коршунов В. А., Бажуков А. А., Мельников Н. Я. Оценка прочности массива горных пород при разработке месторождений открытым способом // *Записки Горного института*. – 2019. – Т. 239. – С. 502 – 509.

12. Нескоромных В. В. Разрушение горных пород при проведении геологоразведочных работ: учебное пособие. – Красноярск: СФУ, 2015. – 396 с.

13. Официальный сайт компании Wirtgen Group [Электронный ресурс]. URL: <https://www.wirtgen-group.com> (дата обращения: 27.12.2020).

14. Применение комплекса горного оборудования Wirtgen Group в сложных горнотехнических условиях Пикалевского карьера [Электронный ресурс]. URL: <https://mining-media.ru/ru/article/ogr/336-primenenie-kompleksa-gornogo-oborudovaniya-wirtgen-group-v-slozhnykh-gornotekhnicheskikh-usloviyakh-pikaljovskogo-karera> (дата обращения: 27.12.2020). **МИАБ**

REFERENCES

1. Moskalev A. N., Pigida E. Yu., Kerekilitsa L. G., Vakhalin Yu. N. *Razrushenie gornykh porod pri termotsiklicheskom vozdeystvii* [Destruction of rocks under thermocyclic effects], Kiev, Naukova dumka, 1987, 250 p.

2. Kurilko A. S., Zakharov E. V. Experimental studies of the effect of negative temperatures on the energy intensity of carbonate rock destruction. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2011, no. S10, pp. 154 – 162. [In Russ].

3. Epshtein S. A., Nikitina I. M., Agarkov K. V., Nesterova V. G., Minaev V. I. Effects of cyclic freezing and thawing on coals quality indices. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2019, no. 6, pp. 5 – 18. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-06-0-5-18.

4. Będkowski T., Kasztelewicz Z., Sikora M. Technical and economic analysis of mechanical rock extraction based on 'Raciszyn' deposit. *Inzynieria Mineralna*. 2016, vol. 17, no. 2, pp. 107 – 112.

5. Ordin A. A. Schwabenland E. E. Evaluation of technological parameters for apatite extraction by surface miners. *Journal of Mining Science*. 2016, vol. 52, no. 2, pp. 293 – 299.

6. Volk H. Wirtgen drives the development of surface mining. *Procedia Engineering*. 2016, vol. 138, pp. 30 – 39.

7. Kramadibrata S., Simangunsong G. M., Widodo N. P., Wattimena R. K., Tanjung R. A., Wicaksana Y. Rock excavation by continuous surface miner in limestone quarry. *Geosystem Engineering*. 2015, vol. 18, no. 3, pp. 1 – 13.

8. Korshunov V. A., Petrov D. N., Yastrebova K. N. Design method for building a rock strength certificate based on the results of tests of samples by spherical indentors. *Innovatsionnye napravleniya v proektirovanii gornodobyvayushchikh predpriyatii: geomekhanicheskoe obespechenie proektirovaniya i soprovozhdeniya gornyykh rabot. VIII Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya. Sbornik nauchnykh trudov* [Innovative directions in the design of mining enterprises: geomechanical support for the design and maintenance of mining works. VIII International Scientific and Practical Conference. Collection of scientific works], Saint-Petersburg, SPbGU, 2017, pp. 256 – 265. [In Russ].

9. Korshunov V. A., Kartashov Yu. M. A new method for determining the ultimate tensile strength of rocks. *Journal of Mining Institute*. 2011, vol. 190, pp. 202 – 206. [In Russ].

10. Korshunov V. A., Kartashov Yu. M., Kozlov V. A. Determination of rock strength passport indices by the method of destruction of samples by spherical indentors. *Journal of Mining Institute*. 2011, vol. 185, pp. 41 – 45. [In Russ].

11. Pavlovich A. A., Korshunov V. A., Bazhukov A. A., Melnikov N. Ya. Assessment of the strength of the rock mass during the development of deposits in an open way. *Journal of Mining Institute*. 2019, vol. 239, pp. 502 – 509. [In Russ].

12. Neskromnykh V. V. *Razrushenie gornyykh porod pri provedenii geologorazvedochnyykh rabot: uchebnoe posobie* [Destruction of rocks during exploration: Educational aid], Krasnoyarsk, SFU, 2015, 396 p.

13. *The official website of the Wirtgen Group*, available at: <https://www.wirtgen-group.com> (accessed 27.12.2020).

14. *Primenenie kompleksa gornogo oborudovaniya Wirtgen Group v slozhnykh gornotekhnicheskikh usloviyakh Pikalevskogo kar'era*, available at: <https://mining-media.ru/ru/article/ogr/336-primenenie-kompleksa-gornogo-oborudovaniya-wirtgen-group-v-slozhnykh-gornotekhnicheskikh-usloviyakh-pikaljovskogo-karera> (accessed 27.12.2020).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Якубовский Матвей Матвеевич¹ — канд. техн. наук, доцент,

e-mail: yakubovskiy_mm@pers.spmi.ru,

Михайлова Елена Андреевна¹ — студент,

e-mail: elena_mikhailova96@mail.ru,

Бажуков Александр Алексеевич¹ — инженер,

Научный центр геомеханики и проблем горного производства,

e-mail: alex.bajukov2016@yandex.ru,

¹ Санкт-Петербургский горный университет.

Для контактов: Михайлова Е.А., e-mail: elena_mikhailova96@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

M.M. Yakubovskiy¹, Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor,

e-mail: yakubovskiy_mm@pers.spmi.ru,

E.A. Mikhailova¹, Student,

e-mail: elena_mikhailova96@mail.ru,

A.A. Bazhukov¹, Engineer,

Scientific Center for Geomechanics and Mining Problems,

e-mail: alex.bajukov2016@yandex.ru,

¹ Saint-Petersburg Mining University,

199106, Saint-Petersburg, Russia.

Corresponding author: E.A. Mikhailova, e-mail: elena_mikhailova96@mail.ru.

Получена редакцией 31.12.2020; получена после рецензии 19.02.2021; принята к печати 10.09.2021.

Received by the editors 31.12.2020; received after the review 19.02.2021; accepted for printing 10.09.2021.