

## ВЛИЯНИЕ ЦИКЛИЧЕСКОГО ЗАМОРАЖИВАНИЯ-РАЗМОРАЖИВАНИЯ УГЛЕЙ НА ПОКАЗАТЕЛИ ИХ КАЧЕСТВА

С.А. Эпштейн<sup>1</sup>, И.М. Никитина<sup>1</sup>, К.В. Агарков<sup>1</sup>, В.Г. Нестерова<sup>1</sup>, В.И. Минаев<sup>1</sup>

<sup>1</sup> НИТУ «МИСиС», Москва, Россия, e-mail: apshstein@yandex.ru

**Аннотация:** Рассмотрены климатические условия добычи и транспортировки углей в регионах Арктики и Крайнего Севера. Показано, что в весенний и осенний периоды угли могут подвергаться неоднократным воздействиям замораживания и размораживания, что определяет возможность изменения их структуры, и механических свойств и качества в целом. Проведены экспериментальные исследования влияния циклического замораживания-размораживания (ЦЗР) на показатели качества углей разных видов и их трещиновато-пористую структуру. Условия ЦЗР: минимальная температура воздействия  $-40^{\circ}\text{C}$ , максимальная  $+5^{\circ}\text{C}$ , относительная влажность 70%, количество циклов обработки от 1 до 4. Показано, что в заданных условиях циклических воздействий происходит изменение трещиновато-пористой структуры бурого и каменных углей. Отмечено, что при увеличении количества циклов ЦЗР происходит изменение высшей теплоты сгорания (на сухое беззолное состояние топлива) углей по сравнению с исходным углем. Установлено, что циклическое замораживание и размораживание бурого угля приводит к уменьшению содержания в нем общей и особенно аналитической влаги. При этом отмечено существенное увеличение низшей теплоты сгорания бурого угля, что, в самом общем случае, может быть связано со снижением в нем содержания влаги.

**Ключевые слова:** уголь, криогенное выветривание, цикл замораживания-разморозки, качество, трещиноватость

**Благодарность:** Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 18-05-70002).

**Для цитирования:** 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.

### Effects of cyclic freezing and thawing on coals quality indices

S.A. Epshtein<sup>1</sup>, I.M. Nikitina<sup>1</sup>, K.V. Agarkov<sup>1</sup>, V.G. Nesterova<sup>1</sup>, V.I. Minaev<sup>1</sup>

<sup>1</sup> National University of Science and Technology «MISS», Moscow, Russia, e-mail: apshstein@yandex.ru

**Abstract:** The article considers the climatic conditions of coal mining and transportation in the regions of the Arctic and the Far North. It is shown that during the spring and autumn periods, coals can be exposed to multiple freezing and thawing, which determines the possibility of changing the structural and mechanical properties of coal and their quality in general. Experimental studies of the effect of cyclic freeze-thawing (CFT) on the quality indices of coals of different types and their fractured-porous structure have been carried out. CFT conditions were as follows: the minimum exposure temperature is  $-40^{\circ}\text{C}$ , maximum  $+5^{\circ}\text{C}$ , relative humidity 70%, number of cycles varied from 1 to 4. It is shown that under given conditions of the cyclic impacts, there exists a change in

the fractured-porous structure of lignite and hard coals. It is found that, with the increase in the number of CFT cycles, a change occurs in the gross calorific value of coals (on dry ash-free basis of the fuel) as compared to the untreated ones. It has been established that cyclic freezing and thawing of lignite leads to a decrease in its total and, especially, the analytical moisture contents. At the same time, a significant increase in the net calorific value of lignite was noted, which, in the most general case, may be associated with a decrease in its moisture content.

**Key words:** coal, cryogenic weathering, freeze-thaw cycle, quality, fracturing.

**Acknowledgements:** This work was financially supported by the Russian Foundation of Fundamental Research (grant No 18-05-70002).

**For citation:** 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;(6):5-18. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-06-0-5-18.

## Введение

В последние десятилетия возрос интерес к исследованиям, связанным с низкотемпературными воздействиями на уголь. В первую очередь, это относится к разработке способов хранения технологических газов с высоким содержанием  $\text{CO}_2$  в отработанных пространствах угольных шахт [1]. Предлагаемые технологии предусматривают сбор, сжижение, перевозку таких газов (при низкой температуре и высоком давлении) и их закачку в подземные коллекторы, во время которой температура может понижаться вплоть до  $-40^\circ\text{C}$  (технологии « $\text{CO}_2$  storage») [1]. Лабораторные исследования показали, что низкотемпературные воздействия на уголь приводят к повышению его проницаемости и способности к необратимой сорбции углекислого газа [2–4]. Интерес к подобным технологиям обусловлен также тем фактом, что закачивание жидкого углекислого газа в угольные пласты приводит к вытеснению из них метана [4, 5]. Авторами [6] и др. отмечено, что проницаемость и способность углей сорбировать углекислый газ усиливается после циклических замораживания и разморозки (ЦЗР). Это связано, в первую очередь, с тем, что такие процессы приводят к изменению механических свойств углей, в том числе к их разупрочнению [6–9] и увеличению порового пространства [4, 10–13]. От-

мечено улучшение размолоспособности углей, прошедших циклические замораживание-разморозку [14], что, по всей видимости, также связано с повышением их структурной нарушенности. По мнению [13] причиной развития трещин в углях после ЦЗР является присутствие воды в порах и ее миграция при размораживании.

Уникальные климатические условия Крайнего Севера и Арктики и тот факт, что значительные запасы углей в Российской Федерации сосредоточены именно в этих зонах [15], обуславливают интерес к исследованиям влияния циклических замораживания и разморозки на свойства углей, определяющие их качество, технологическую и энергетическую ценность. Регионы Арктики и Крайнего Севера характеризуются экстремальными климатическими условиями, проявляющимися как в значительных среднегодовых, среднемесячных и дневных перепадах температур с переходом через ноль, так и в перепадах влажности [16]. Это, в свою очередь, приводит к возникновению новых, специфических именно для таких областей, рисков ведения добычи, транспортировки, а также хранения и переработки углей. Так, например, разупрочнение углей под воздействиями естественных ЦЗР может служить причиной повышения способности таких углей к окислению (с точки зрения увеличения

доступной для окисления поверхности) и рискам самовозгорания [17–19].

Однако несмотря на высокий интерес к изучению влияния ЦЗР на сорбционные и механические свойства углей, следует заметить, что авторами настоящей статьи практически не найдено исследований, посвященных характеристике изменения качества углей после указанных воздействий. Кроме того, практически отсутствуют (за исключением [20, 21]) работы, посвященные оценке изменения склонности углей к окислению после ЦЗР. При этом естественно предположить, что качественные характеристики углей, извлеченных из месторождений, расположенных в северных регионах, и перевезенных до места использования (в железнодорожных составах и по морским путям), могут изменяться. Это связано с тем, что по маршрутам следования составов наземного либо морского транспорта высока вероятность того, что угольная продукция будет подвергаться циклическому замораживанию и оттаиванию.

Целью настоящей работы является оценка изменения показателей качества углей под воздействием циклов замораживания-разморозки. При выборе режимов низкотемпературной циклической обработки учитывали данные о климатических условиях в районах самых круп-

ных угольных месторождений, расположенных на территории Крайнего Севера и Арктики в Российской Федерации, а также путей их следования в места отгрузки или использования.

## **Материалы и методы**

### *Климатические условия на территориях основных угольных месторождений Крайнего Севера и Арктики*

На территории Арктической зоны и Крайнего Севера располагаются (полностью или частично) Печорский, Тунгусский, Ленский, Южно-Якутский, Зырянский угольные бассейны [22, 23]. Информация о климатических условиях, а именно, суточных и сезонных перепадах температур и влажности подготовлена по данным наиболее крупных метеорологических станций близлежащих к районам угледобычи городов. Данные о среднегодовых перепадах температур и влажности за период с 01.01.2014. г по 01.01.2019 г. приведены в табл. 1 [16].

Важно заметить, что помимо широкого среднегодового диапазона температур, в весенние и осенние периоды в рассматриваемых регионах наблюдаются существенные перепады суточных значений температур с диапазонами, достигающими 10–15 °С и переходами через ноль [16].

Таблица 1

### **Среднегодовые перепады температур и влажности в точках метеонаблюдения угольных бассейнов**

#### *Average differences of temperature and humidity at weather observation points in coal fields*

Место метеонаблюдения	Среднегодовой перепад температур, °С	Среднегодовой перепад влажности, %
ПГТ Зырянка (Зырянский угольный бассейн)	-34,6...+15,2	61...80
г. Воркута (Печерский угольный бассейн)	-19,6...+13,9	69...84
г. Инта (Печерский угольный бассейн)	-20,1...+15,5	69...88
ПГТ Диксон (Таймырский угольный бассейн)	-22,5...+6,6	81...91
г. Норильск (Тунгусский угольный бассейн)	-28,1...+15	68...82

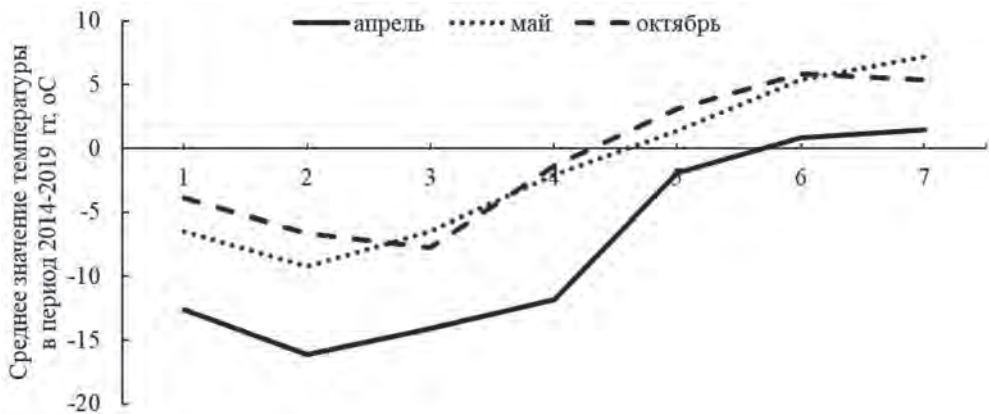


Рис. 1. Изменение температурных условий в ключевых точках метеонаблюдения по маршруту Диксон-Ванино в весенний и осенний периоды. 1–7 соответствуют следующим ключевым точкам маршрута: 1 – Диксон; 2 – мыс Челюскин; 3 – Тикси; 4 – Певек; 5 – Провидение; 6 – Петропавловск-Камчатский; 7 – Ванино

Fig. 1. Change in temperature conditions at prime points of weather observations along Dikson-Vanino route in summer and autumn: 1–7 mark the prime route points: 1 – Dixon; 2 – Cape Chelyuskin; 3 – Tiksi; 4 – Pevek; 5 – Providenie; 6 – Petropavlovsk-Kamchatsky; 7 – Vanino

Различия в климатических условиях по маршрутам следования угольной продукции от мест добычи до мест отгрузки потребителям

Перевозка угля, добытого в Арктической зоне и на территории Крайнего Севера в перспективе будет осуществля-

ться водным транспортом по Северному морскому пути (СМП) [24, 25]. В настоящей работе были рассмотрены изменения температуры и влажности по ходу доставки угля по двум маршрутам: первый – тихоокеанское направление по северному морскому пути, второй – до-

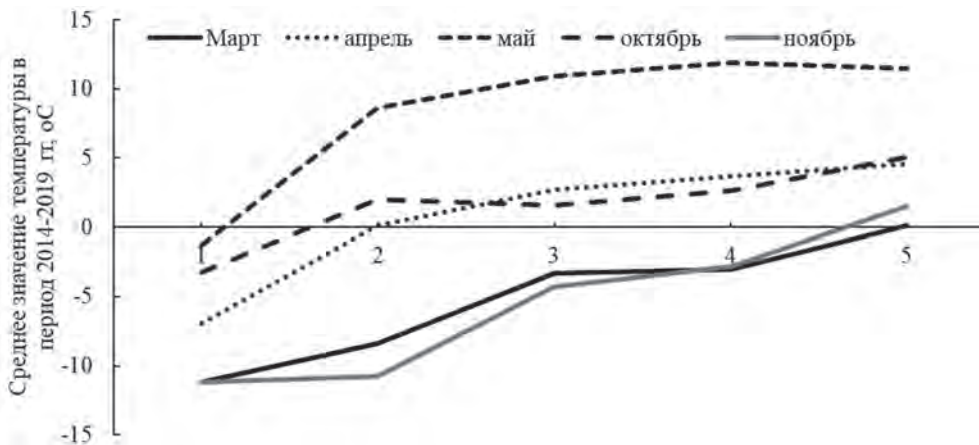


Рис. 2. Изменение температурных условий в ключевых точках метеонаблюдения по маршруту г. Воркута – порт Усть-Луга. 1–5 обозначают следующие ключевые точки маршрута: 1 – Воркута; 2 – Ухта; 3 – Котлас; 4 – Вологда; 5 – Усть-Луга

Fig. 2. Change in temperature conditions at prime points of weather observations along Vorkuta-Ust-Luga Port route: 1–5 mark the prime route points: 1 – Vorkuta; 2 – Ukhta; 3 – Kotlas; 4 – Vologda; 5 – Ust-Luga

ставка с использованием железнодорожного сообщения.

1. Порт Диксон (Таймырский угольный бассейн) — порт Ванино (Хабаровский край).

Изменения средней температуры, рассчитанные в период с 01.01.2014 по 01.01.2019 гг., при доставке груза по приведенному выше маршруту в весенне-осенний периоды представлены на рис. 1. Данные по другим месяцам менее информативны, так как не содержат информацию о переходе из зоны отрицательных в зону положительных температур и наоборот.

2. Г. Воркута (Печорский угольный бассейн) — порт Усть-Луга (Ленинградская область).

Изменения средней температуры, рассчитанные в период с 01.01.2014 по 01.01.2019 гг. при доставке груза по приведенному выше маршруту в весенне-осенний периоды, представлены на рис. 2. Данные по другим месяцам также мало информативны, так как не содержат информацию о переходе из зоны отрицательных в зону положительных температур и наоборот.

Из приведенных данных видно, что угли при транспортировке из регионов Крайнего Севера и Арктики в весенний и осенний периоды подвергаются неоднократным воздействиям замораживания и размораживания. Более того, в весенний и осенний периоды практически на всей протяженности рассмотренных маршрутов можно обнаружить среднесуточные колебания температур от положительных к отрицательным [26]. Это, в свою очередь, обуславливает актуальность проводимых в настоящей работе исследований.

#### Объекты исследования

В качестве объектов исследования были отобраны угли разных видов и месторождений. Основные характеристики углей представлены в табл. 2.

Бурый уголь (№ 4) отличается высоким содержанием влаги и низким значением высшей теплоты сгорания (на сухое беззольное состояние). Каменный уголь высокой стадии метаморфизма (№ 1) характеризуется высоким содержанием серы и низким выходом летучих веществ. Каменные угли 2 и 3 характеризуются

Таблица 2

#### Качественные характеристики углей, использованных в работе Qualitative behavior of coal ranks used in the studies

№	Месторождение	Вид	W <sup>t</sup> , %	W <sup>a</sup> , %	A <sup>d</sup> , %	V <sup>daf</sup> , %	Q <sub>s</sub> <sup>daf</sup> , ккал/кг	S <sup>d</sup> , %
1	Донбасс	каменный уголь высокой стадии метаморфизма	1,1	1,4	11,7	6,6	8028	1,53
2	Апсатское угольное месторождение	каменный средней стадии метаморфизма	1,0	0,6	9,0	21,8	8456	0,24
3	Апсатское угольное месторождение	каменный средней стадии метаморфизма	0,6	0,6	10,6	25,4	8579	0,30
4	Канско-Ачинский	бурый	29,5	17,3	7,2	47,9	6744	0,36

Примечание: W<sup>t</sup>, % — содержание общей влаги; W<sup>a</sup>, % — аналитическая влага; A<sup>d</sup>, % — зольность на сухое состояние топлива; V<sup>daf</sup>, % — выход летучих веществ (на сухое беззольное состояние топлива); Q<sub>s</sub><sup>daf</sup>, ккал/кг — высшая теплота сгорания на сухое беззольное состояние; S<sup>d</sup>, % — содержание серы на сухое состояние топлива.



Рис. 3. Размещение образцов углей в климатической камере

Fig. 3. Coal samples in climate cell

сравнительно низкой зольностью и небольшим содержанием серы.

Для исследования использовали представительные пробы углей крупностью менее 3 мм и куски (30–50 мм).

*Методика проведения экспериментов по циклическому замораживанию и размораживанию образцов углей*

Для исследования влияния ЦЗР на показатели качества углей были выбраны

следующие условия: минимальная температура обработки углей –40 °С, максимальная +5 °С, относительная влажность 70%.

Для экспериментальных работ была использована программируемая климатическая камера «КТХВ-150» со следующими характеристиками: объем камеры – 150 л, диапазон задаваемых температур от –70 до +150 °С (точность поддержания температуры ±0,5 °С). Диапазон поддержания относительной влажности в камере от 20 до 98% с допустимым отклонением от 1 до 3%. В камере реализовано воздушное охлаждение рабочей зоны.

Образцы углей для испытаний помещали в открытые алюминиевые контейнеры (рис. 3).

Алгоритм одного цикла замораживания и разморозки (ЦЗР 1) состоял из следующих этапов (рис. 4):

- 1) помещали контейнеры с углем в камеру; в течение 1 ч поддерживали начальные условия – температура в климатической камере +20 °С, влажность – 70%;
- 2) в течение 1 ч температуру в камере снижали до –40 °С;
- 3) в течение 2 ч образцы выдерживали при постоянной температуре –40 °С;

10-04-19		ПРОГРАММА		15:54:22
N	Темп, град. С	Влажн, %	Время, мин	
0	+20.0	+70.0	+60.0	
1	+20.0	+70.0	+60.0	
2	-40.0	+0.0	+60.0	
3	-40.0	+0.0	+120.0	
4	+5.0	+70.0	+60.0	
5	+5.0	+70.0	+60.0	
0	+0.0	+0.0	+0.0	
0	+0.0	+0.0	+0.0	

Рис. 4. Программа установки режима одного цикла замораживания-разморозки углей в климатической камере

Fig. 4. Setting program of coal freeze–thaw cycle in climate cell



4) в течение 1 ч температуру в камере повышали до +5 °С, влажность до 70%;

5) в течение 1 ч образцы выдерживали при температуре +5 °С и влажности 70%.

В работе были проведены эксперименты, состоящие из одного, двух, трех и четырех ЦЗР. Двукратный ЦЗР (ЦЗР 2) проводили путем добавления к алгоритму ЦЗР 1 операций 2–5. В последующих циклах (ЦЗР 3 и ЦЗР 4) к алгоритму ЦЗР 1 двукратно и трехкратно добавляли те же операции.

После проведения экспериментов по ЦЗР образцы углей вынимали из климатической камеры и герметично упаковывали в полиэтиленовые пакеты для исключения возможного окисления.

#### *Определение показателей качества углей до и после ЦЗР*

Для характеристики основных показателей качества углей определяли технический состав — содержание влаги (ГОСТ 8.649-2015 и ГОСТ 33503-2015, зольность (ГОСТ Р 55661-2013), выход летучих веществ (ГОСТ Р 55660-2013), содержание общей серы (ГОСТ 32465-2013), теплоту сгорания по ГОСТ 147-2013. Полученные результаты приведены в табл. 2 и табл. 3.

Дополнительно была проведена качественная оценка изменения трещиновато-пористой структуры углей. Для этого из кусков углей (исходных и после различных циклов ЦЗР) готовили аншлиф-штуфы по ГОСТ Р 55663-2013 «Методы петрографического анализа углей. Часть 2. Методы подготовки проб углей». Куски углей предварительно проваривали в смеси канифоли и парафина (соотношение 9:1). Дальнейшую подготовку аншлиф-штуфов проводили на шлифовально-полировальном станке RotoPol-35. Для исследования трещиновато-пористой структуры поверхности образцов использовали оптический микроскоп Olympus BX 51, совмещенный с комплексом для петрогра-

фического анализа Lucia Vitrinite (LECO). Микроскопические исследования были проведены при разных увеличениях (x75, воздушная среда и x300, водная иммерсия).

#### **Результаты и обсуждение**

Анализ результатов исследований (табл. 3) показал, что содержание в каменных углях (№ 2 и 3) общей влаги практически не изменяется после ЦЗР. Для каменного угля высокой стадии метаморфизма этот показатель незначительно возрастает при увеличении числа циклов замораживания-размораживания. Для бурого угля ЦЗР приводит к небольшому снижению общей влаги, при этом отмечено значительное уменьшение содержания аналитической влаги после ЦЗР 3. Следует отметить, что измерения содержания аналитической влаги в необработанном угле и в углях после ЦЗР проводили в одно и то же время, что исключает влияние на величину этого показателя изменений температуры и влажности в лаборатории.

Зольность и выход летучих веществ для всех исследованных углей не меняются после ЦЗР по сравнению с исходными. Также значимо не изменяется содержание в углях общей серы.

Интересно отметить колебания высшей теплоты сгорания углей (на *daf*) после ЦЗР. Для всех образцов, кроме каменного угля высокой стадии метаморфизма (№ 1), после однократного замораживания-размораживания можно обнаружить изменение этого показателя. Для угля № 2 происходит увеличение высшей теплоты сгорания, а для углей № 3 и 4 ее уменьшение по сравнению с исходными. При увеличении количества циклов высшая теплота сгорания бурого угля постепенно повышается и после 4-х циклов становится сопоставимой с исходным углем. Аналогичные изменения этого показателя наблюдаются и для каменного

Таблица 3

**Показатели качества углей после циклического замораживания и разморозки  
(в сопоставлении с исходными углями)  
Quality indexes of coal after freeze and thaw cycles (versus initial coal)**

№ угля	Показатели	Число циклов обработки				
		0	ЦЗР 1	ЦЗР 2	ЦЗР 3	ЦЗР 4
1	$W^l$ , %	1,1	1,5	1,7	1,9	2,1
	$W^a$ , %	1,4	1,6	1,3	1,6	1,1
	$A^d$ , %	11,7	11,7	11,5	12,3	12,2
	$V^{daf}$ , %	6,6	6,3	6,1	6,3	6,1
	$Q_s^{daf}$ , ккал/кг	8028	8042	8096	7965	7992
	$Q_p^r$ , ккал/кг	6944	6926	6959	6830	6837
	$S^d$ , %	1,5	1,6	1,6	1,6	1,6
2	$W^l$ , %	1,0	0,8	1,0	1,2	1,1
	$W^a$ , %	0,6	0,6	0,6	0,7	0,5
	$A^d$ , %	9,0	8,9	9,0	9,0	8,9
	$V^{daf}$ , %	21,8	21,8	21,9	21,9	21,8
	$Q_s^{daf}$ , ккал/кг	8456	8484	8467	8483	8479
	$Q_p^r$ , ккал/кг	7407	7448	7417	7415	7419
	$S^d$ , %	0,24	0,25	0,25	0,25	0,25
3	$W^l$ , %	0,6	0,7	0,8	0,8	0,9
	$W^a$ , %	0,6	0,6	0,5	0,7	0,5
	$A^d$ , %	10,6	11,5	10,5	10,6	10,9
	$V^{daf}$ , %	25,4	25,3	25,4	25,3	25,3
	$Q_s^{daf}$ , ккал/кг	8579	8512	8575	8605	8556
	$Q_p^r$ , ккал/кг	7413	7345	7393	7420	7368
	$S^d$ , %	0,30	0,30	0,36	0,32	0,32
4	$W^l$ , %	29,5	25,5	24,0	25,2	26,0
	$W^a$ , %	17,3	22,2	18,8	12,5	7,6
	$A^d$ , %	7,2	7,1	7,1	7,4	7,3
	$V^{daf}$ , %	47,9	48,3	47,7	47,0	47,0
	$Q_s^{daf}$ , ккал/кг	6744	6681	6684	6709	6764
	$Q_p^r$ , ккал/кг	4019	4269	4359	4283	4261
	$S^d$ , %	0,36	0,36	0,34	0,38	0,36

угля № 3. Для каменного угля высокой стадии метаморфизма (№ 1) отмечено постепенное снижение величины высшей теплоты сгорания при увеличении числа ЦЗР. Аналогичные изменения (кроме бурого угля) были обнаружены и для показателей низшей теплоты сгорания на рабочее состояние топлива. Интерес-

но отметить, что после ЦЗР происходит заметное увеличение низшей теплоты сгорания бурого угля, что в самом общем случае может быть связано с существенным уменьшением в нем влаги.

Исследование поверхности углей после ЦЗР показало, что трещиновато-пористая структура каменного угля высокой



стадии метаморфизма (№ 1) после ЦЗР воздействия не претерпела никаких видимых изменений. Микрофотографии поверхности каменных углей до и после ЦЗР (на примере угля № 2) показаны на рис. 5. Поверхность исходного угля № 2 характеризуется тонкими V-образными трещинами (рис. 5, а), После первого ЦЗР характер расположения трещин при-

обретает «блочную» структуру, состоящую из упорядоченных параллельных и перпендикулярных трещин с небольшим количеством ответвлений (рис. 5, б), Одновременно возрастает количество трещин и ширина их раскрытия, После второго ЦЗР раскрытие трещин практически не изменилось, однако размер «блоков» уменьшился, что свидетельствует о росте

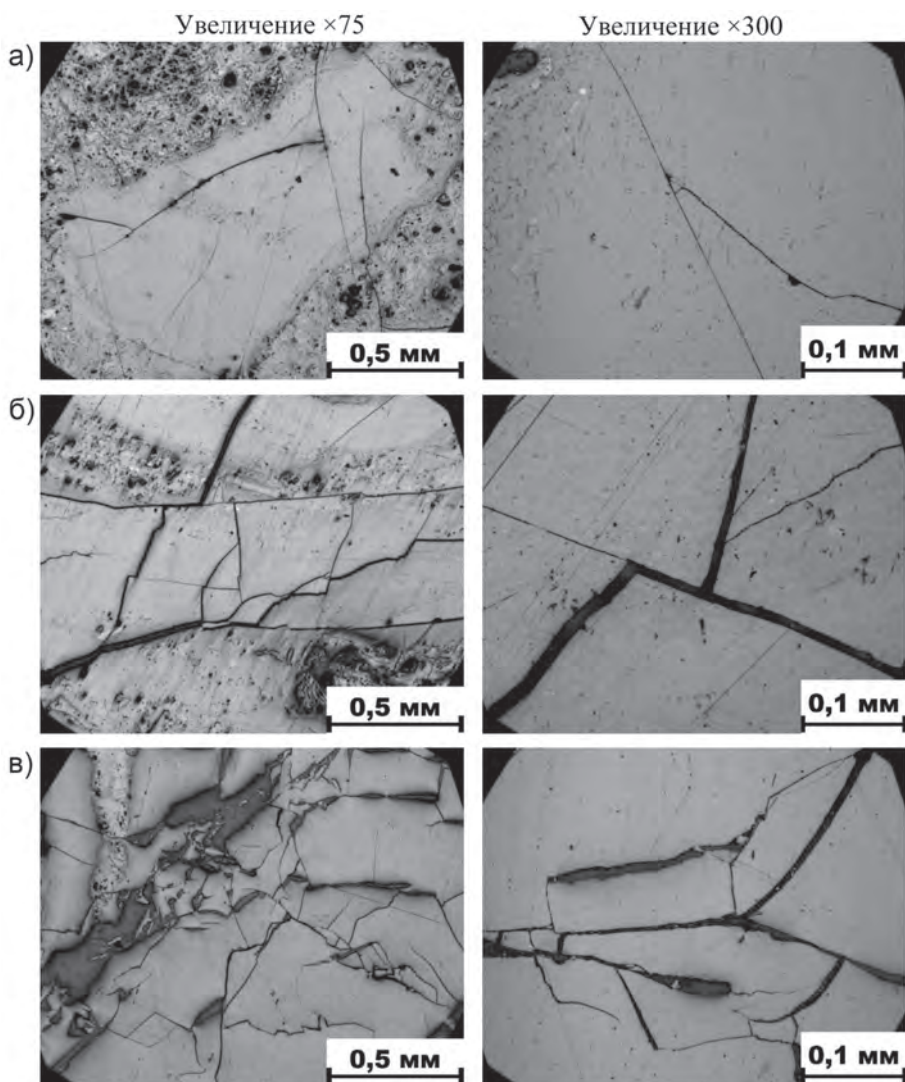


Рис. 5. Трещиноватость поверхности угля № 2 в зависимости от количества циклов замораживания-разморозки: исходный уголь (а); после ЦЗР 1 (б); уголь после ЦЗР 4 (в)

Fig. 5. Surface jointing of coal sample No. 2 depending on freeze-thaw cycles (FTC): (a) initial coal; (b) after 1 FTC; (v) after 4 FTC

числа трещин. После ЦЗР 4 на поверхности образца кроме увеличения числа трещин обнаружены многочисленные ответвления от «блоков» (см, рис. 5, в). Аналогичные изменения были обнаружены для угля № 3.

Трещиноватость бурого угля в значительной степени зависит от содержания в нем влаги. Для снижения этого эффек-

та образцы бурого угля предварительно проваривали в смеси канифоли и парафина. Поверхность бурого угля характеризуется трещинами разной формы, ширина раскрытия которых имеет достаточно большой диапазон. После двукратного ЦЗР было выявлено, что ширина раскрытия трещин возросла как по сравнению с ЦЗР 1, так и с исходным углем, при

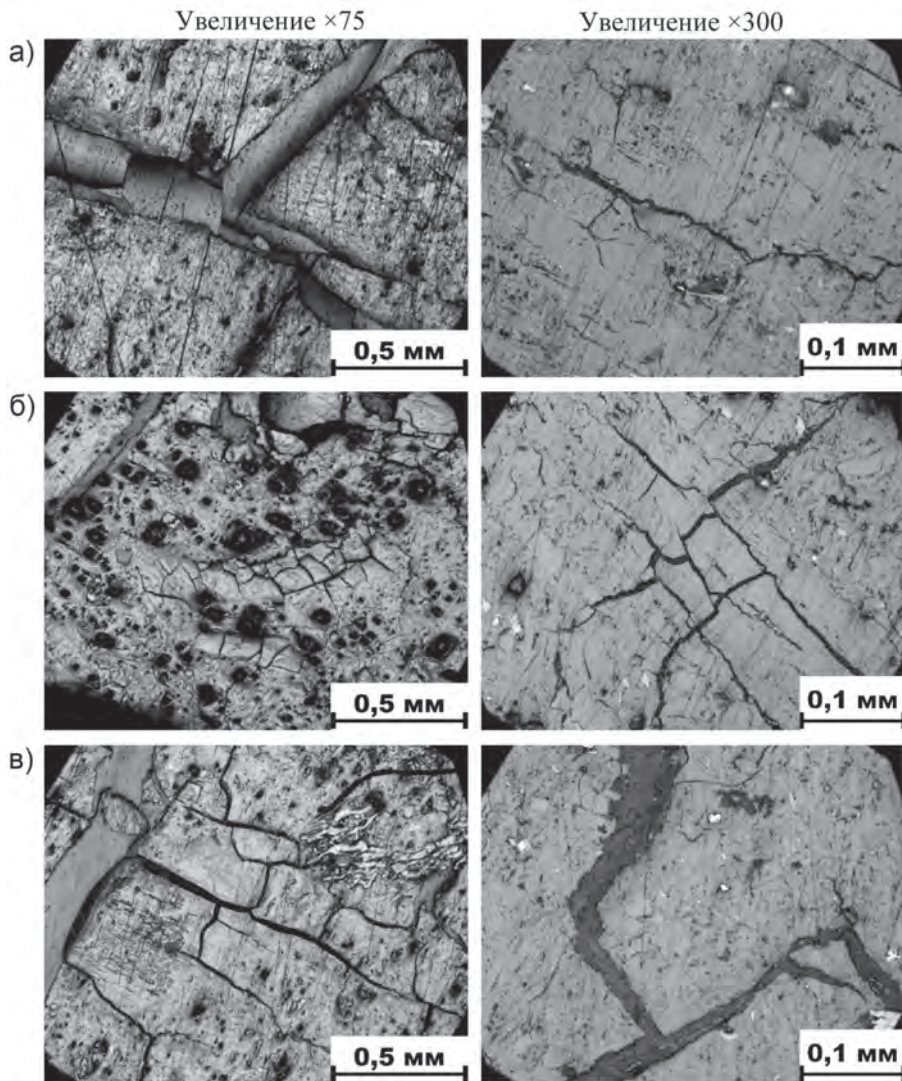


Рис. 6. Трещиноватость поверхности бурого угля в зависимости от количества циклов замораживания-разморозки: исходный уголь (а); после ЦЗР 1 (б); уголь после ЦЗР 4 (в)

Fig. 6. Surface jointing of brown coal depending on freeze-thaw cycles (FTC): (a) initial coal; (b) after 1 FTC; (v) after 4 FTC

этом диапазон раскрытия сузился. При этом в угольном веществе проявились широкие (до 50 мкм) трещины, однако практически исчезли трещины с малой шириной раскрытия. Возможно, это связано с частичным уплотнением угольного вещества, расположенного между крупными трещинами. Аналогичные наблюдения были сделаны после последующих (ЦЗР 3 и ЦЗР 4) воздействий.

### Выводы

1. Проанализированы климатические условия добычи и транспортировки углей в регионах Арктики и Крайнего Севера. Показано, что в весенний и осенний периоды угли могут подвергаться неоднократным воздействиям замораживания и размораживания, что может приводить к изменению показателей их качества по сравнению с показателями, характеризующими добытое топливо.

2. Проведены экспериментальные исследования по циклическому замораживанию-размораживанию углей разных видов (бурый, каменные средней и высокой стадий метаморфизма). Показано, что при выбранных условиях воздействий, происходит изменение трещиновато-пористой структуры бурого и каменных углей. Отмечено, что при циклических воздействиях происходит изменение высшей теплоты сгорания (на сухое беззольное состояние топлива) по сравнению с необработанным углем.

3. Установлено, что циклическое замораживание и размораживание бурого угля приводит к уменьшению содержания в нем общей и особенно аналитической влаги. При этом отмечено существенное увеличение низшей теплоты сгорания бурого угля, что, в самом общем случае, может быть связано со снижением в нем содержания влаги.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Scibioh M. A., Viswanathan B. CO<sub>2</sub> – Capture and Storage // Carbon Dioxide to Chemicals and Fuels, Elsevier, 2018, pp. 61–130. DOI: 10.1016/B978-0-444-63996-7.00003-1.
2. Wen H., Li Z., Deng J., Shu C. M., Laiwang B., Wang Q., Ma L. Influence on coal pore structure during liquid CO<sub>2</sub>-ECBM process for CO<sub>2</sub> utilization // Journal of CO<sub>2</sub> Utilization, 2017. Vol. 21, pp. 543–552. DOI: 10.1016/j.jcou.2017.09.002.
3. Qu H., Liu J., Chen Z., Wang J., Pan Z., Connell L., Elsworth D. Complex evolution of coal permeability during CO<sub>2</sub> injection under variable temperatures // International Journal of Greenhouse Gas Control, 2012. Vol. 9, pp. 281–293. DOI: 10.1016/j.ijggc.2012.04.003.
4. Xu J., Zhai C., Liu S., Qin L., Wu S. Pore variation of three different metamorphic coals by multiple freezing-thawing cycles of liquid CO<sub>2</sub> injection for coalbed methane recovery // Fuel, 2017. Vol. 208, pp. 41–51. DOI: 10.1016/j.fuel.2017.07.006.
5. Astakhov A. V., Belyj A. A., Shirochin D. L. Study of coal structure by swelling technique // Химия твердого топлива. — 2002. — № 2. — С. 3–10.
6. Qin L., Zhai C., Liu S., Xu J. Factors controlling the mechanical properties degradation and permeability of coal subjected to liquid nitrogen freeze-thaw // Scientific Reports, 2017. Vol. 7, no 1, pp. 3675. DOI: 10.1038/s41598-017-04019-7.
7. Cai C., Li G., Huang Z., Tian S., Shen Z., Fu X. Experiment of coal damage due to supercooling with liquid nitrogen // Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2015. Vol. 22, pp. 42–48. DOI: 10.1016/j.jngse.2014.11.016.
8. Cai C., Gao F., Li G., Huang Z., Hou P. Evaluation of coal damage and cracking characteristics due to liquid nitrogen cooling on the basis of the energy evolution laws // Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2016. Vol. 29, pp. 30–36. DOI: 10.1016/j.jngse.2015.12.041.
9. Qin L., Zhai C., Liu S., Xu J., Yu G., Sun Y. Changes in the petrophysical properties of coal subjected to liquid nitrogen freeze-thaw. A nuclear magnetic resonance investigation // Fuel, 2017. Vol. 194, pp. 102–114. DOI: 10.1016/j.fuel.2017.01.005.



10. Zhai C., Wu S., Liu S., Qin L., Xu J. Experimental study on coal pore structure deterioration under freeze–thaw cycles // *Environmental Earth Sciences*, 2017. Vol. 76, no 15, pp. 507. DOI: 10.1007/s12665-017-6829-9.

11. Liu S. Q., Sang S. X., Liu H. H., Zhu Q. P. Growth characteristics and genetic types of pores and fractures in a high-rank coal reservoir of the southern Qinshui basin // *Ore Geology Reviews*, 2015. Vol. 64, no 1, pp. 140–151. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2014.06.018.

12. Yu Y., Liang W., Hu Y., Meng Q. Study of micro-pores development in lean coal with temperature // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2012. Vol. 51, pp. 91–96. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2012.01.010.

13. Sun Y., Zhai C., Qin L., Xu J., Yu G. Coal pore characteristics at different freezing temperatures under conditions of freezing–thawing cycles // *Environmental Earth Sciences*, 2018. Vol. 77, no 13, pp. 525. DOI: 10.1007/s12665-018-7693-y.

14. Singh V., Saxena V. K., Raj R., Venugopal R. Artificial weathering of coal to enhance milling performance // *Fuel*, 2015. Vol. 142, pp. 117–120. DOI: 10.1016/j.fuel.2014.11.016.

15. Угольная база России / Под ред. А. А. Тимофеева и др. Т. 1–6. — М.: Геоинформцентр, 2001.

16. «Расписание Погоды» [Электронный ресурс]. URL: rp5.ru.

17. Федорова С. Е. Проблемы пожарной и экологической безопасности разработки угольных месторождений криолитозоны // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. — 2009. — № S12. — С. 329–333.

18. Федорова С. Е. Прогноз и профилактика эндогенной пожароопасности угольных месторождений криолитозоны // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. — 2007. — № S14. — С. 206–209.

19. Deng J., Xiao Y., Li Q., Lu J., Wen H. Experimental studies of spontaneous combustion and anaerobic cooling of coal // *Fuel*, 2015. Vol. 157, pp. 261–269. DOI: 10.1016/j.fuel.2015.04.063.

20. Новиков Е. А., Шкуратник В. Л., Эпштейн С. А., Нестерова В. Г., Добрякова Н. Н. О возможности оценки окисленности угля по акустической эмиссии, стимулированной в нем термомударным воздействием // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. — 2013. — № 8. — С. 90–96.

21. Новиков Е. А., Добрякова Н. Н., Шкуратник В. Л., Эпштейн С. А. Методы оценки окисленности углей // *Горный журнал*. — 2015. — Т. 2015. — № 5. — С. 30–36. DOI: 10.17580/gzh.2015.05.06.

22. Логинов М. И., Гордеев И. В., Микерова В. Н., Старокожева Г. И. Состояние, проблемы развития и перспективы освоения угольной сырьевой базы // *Минеральные ресурсы России. Экономика и управление*. — 2017. — № 3. — С. 52–61.

23. Никулин А. А. Проблемы национальной стратегии // *Полезные ископаемые Арктической зоны России: потенциал и перспективы освоения*. — 2017. — № 1. — С. 163–187.

24. Разовский Ю. В., Горенкова Е. Ю., Киселева С. П., Косякова И. В., Маколова Л. В. Угольный Арктический доход: классификация и методология оценки // *Уголь*. — 2018. — № 7. — С. 42–44.

25. Агарков С. А., Козьменко С. Ю., Матвишин Д. А. Экономическое освоение арктических месторождений угля: особенности морской транспортировки // *Известия Санкт-Петербургского государственного экономического университета*. — 2018. — № 5. — С. 105–112.

26. Рязанова Н. Е., Соломатов А. С., Сазонов А. А., Никольский Н. В., Колодкин П. А., Кукушкин В. М., Куликов М. Е. Натурные гидрометеорологические исследования в экспедиционных условиях в Арктической зоне // *Комплексная научно-образовательная экспедиция «Арктический плавучий университет-2016»*, 2016. — С. 24–37. **ИДБ**

## REFERENCES

1. Scibioh M. A., Viswanathan B. CO<sub>2</sub> — Capture and Storage. *Carbon Dioxide to Chemicals and Fuels*, Elsevier, 2018, pp. 61–130. DOI: 10.1016/B978-0-444-63996-7.00003-1.

2. Wen H., Li Z., Deng J., Shu C. M., Laiwang B., Wang Q., Ma L. Influence on coal pore structure during liquid CO<sub>2</sub>-ECBM process for CO<sub>2</sub> utilization. *Journal of CO<sub>2</sub> Utilization*, 2017. Vol. 21, pp. 543–552. DOI: 10.1016/j.jcou.2017.09.002.

3. Qu H., Liu J., Chen Z., Wang J., Pan Z., Connell L., Elsworth D. Complex evolution of coal permeability during CO<sub>2</sub> injection under variable temperatures. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2012. Vol. 9, pp. 281–293. DOI: 10.1016/j.ijggc.2012.04.003.

4. Xu J., Zhai C., Liu S., Qin L., Wu S. Pore variation of three different metamorphic coals by multiple freezing-thawing cycles of liquid CO<sub>2</sub> injection for coalbed methane recovery. *Fuel*, 2017. Vol. 208, pp. 41–51. DOI: 10.1016/j.fuel.2017.07.006.
5. Astakhov A.V., Belyj A.A., Shirochin D.L. Study of coal structure by swelling technique. *Khimiya tverdogo topliva*. 2002, no 2, pp. 3–10.
6. Qin L., Zhai C., Liu S., Xu J. Factors controlling the mechanical properties degradation and permeability of coal subjected to liquid nitrogen freeze-thaw. *Scientific Reports*, 2017. Vol. 7, no 1, pp. 3675. DOI: 10.1038/s41598-017-04019-7.
7. Cai C., Li G., Huang Z., Tian S., Shen Z., Fu X. Experiment of coal damage due to supercooling with liquid nitrogen. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2015. Vol. 22, pp. 42–48. DOI: 10.1016/j.jngse.2014.11.016.
8. Cai C., Gao F., Li G., Huang Z., Hou P. Evaluation of coal damage and cracking characteristics due to liquid nitrogen cooling on the basis of the energy evolution laws. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2016. Vol. 29, pp. 30–36. DOI: 10.1016/j.jngse.2015.12.041.
9. Qin L., Zhai C., Liu S., Xu J., Yu G., Sun Y. Changes in the petrophysical properties of coal subjected to liquid nitrogen freeze-thaw. A nuclear magnetic resonance investigation. *Fuel*, 2017. Vol. 194, pp. 102–114. DOI: 10.1016/j.fuel.2017.01.005.
10. Zhai C., Wu S., Liu S., Qin L., Xu J. Experimental study on coal pore structure deterioration under freeze–thaw cycles. *Environmental Earth Sciences*, 2017. Vol. 76, no 15, pp. 507. DOI: 10.1007/s12665-017-6829-9.
11. Liu S.Q., Sang S.X., Liu H.H., Zhu Q.P. Growth characteristics and genetic types of pores and fractures in a high-rank coal reservoir of the southern Qinshui basin. *Ore Geology Reviews*, 2015. Vol. 64, no 1, pp. 140–151. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2014.06.018.
12. Yu Y., Liang W., Hu Y., Meng Q. Study of micro-pores development in lean coal with temperature. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2012. Vol. 51, pp. 91–96. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2012.01.010.
13. Sun Y., Zhai C., Qin L., Xu J., Yu G. Coal pore characteristics at different freezing temperatures under conditions of freezing–thawing cycles. *Environmental Earth Sciences*, 2018. Vol. 77, no 13, pp. 525. DOI: 10.1007/s12665-018-7693-y.
14. Singh V., Saxena V.K., Raj R., Venugopal R. Artificial weathering of coal to enhance milling performance. *Fuel*, 2015. Vol. 142, pp. 117–120. DOI: 10.1016/j.fuel.2014.11.016.
15. *Ugol'naya baza Rossii*. Pod red. A. A. Timofeeva [Coal base of Russia. Timofeev A. A. (Ed.)], Vol. 1–6, Moscow, Geoinformtsentr, 2001.
16. Reliable Prognosis [Electronic resource]. URL: rp5.ru.
17. Fedorova S.E. Problems of fire and ecological safety of cryolite-zone coal deposits development. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2009, no S12, pp. 329–333. [In Russ].
18. Fedorova S.E. Forecast and prevention of the endogenous fire hazard of coal deposits in the cryolithozone. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2007, no S14, pp. 206–209. [In Russ].
19. Deng J., Xiao Y., Li Q., Lu J., Wen H. Experimental studies of spontaneous combustion and anaerobic cooling of coal. *Fuel*, 2015. Vol. 157, pp. 261–269. DOI: 10.1016/j.fuel.2015.04.063.
20. Novikov E.A., Shkuratnik V.L., Epshtein S.A., Nesterova V.G., Dobryakova N.N. The possibility of estimation of coal oxidation by using acoustic emission, stimulated in it by thermal shock. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2013, no 8, pp. 90–96. [In Russ].
21. Novikov E.A., Dobryakova N.N., Shkuratnik V.L., Epshtein S.A. Methods of coal oxidation estimation. *Gornyy Zhurnal*. 2015. T. 2015, no 5, pp. 30–36. DOI: 10.17580/gzh.2015.05.06. [In Russ].
22. Loginov M.I., Gordeev I.V., Mikerova V.N., Starokozheva G.I. State, problems and prospects of development of the coal resource base. *Mineral'nye resursy Rossii. Ekonomika i upravlenie*. 2017, no 3, pp. 52–61. [In Russ].
23. Nikulin A.A. *Problemy natsional'noy strategii* [Problems of national strategy]. *Poleznye iskopayemye Arkticheskoy zony Rossii: potentsial i perspektivy osvoeniya*. 2017, no 1, pp. 163–187. [In Russ].
24. Razovskiy Yu.V., Gorenkova E.Yu., Kiseleva S.P., Kosyakova I.V., Makolova L.V. Coal Arctic revenue: classification and assessment methodology. *Ugol'*. 2018, no 7, pp. 42–44. [In Russ].
25. Agarkov S.A., Kozmenko S.Yu., Matviishin D.A. Economic development of arctic coal deposits: features of maritime transportation. *Izvestiya Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo ekonomicheskogo universiteta*. 2018, no 5, pp. 105–112. [In Russ].

26. Ryazanova N.E., Solomatov A.S., Sazonov A.A., Nikolsky N.V., Kolodkin P.A., Kukushkin V.M., Kulikov M.E. Full-scale hydrometeorological research in the expeditionary conditions in the Arctic zone. *Kompleksnaya nauchno-obrazovatel'naya ekspeditsiya «Arkticheskiy plavuchiy universitet-2016»*, 2016, pp. 24–37. [In Russ].

### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Эпштейн Светлана Абрамовна<sup>1</sup> — д-р техн. наук, старший научный сотрудник, зав. лабораторией, e-mail: apshtein@yandex.ru,

Никитина Изабела Михайловна<sup>1</sup> — канд. техн. наук, ведущий инженер,

Агарков Кирилл Владимирович<sup>1</sup> — инженер,

Нестерова Валерия Георгиевна<sup>1</sup> — канд. техн. наук, ведущий инженер,

Минаев Владимир Иванович<sup>1</sup> — канд. техн. наук, ведущий инженер,

<sup>1</sup> НИТУ «МИСиС», научно-учебная испытательная лаборатория «Физико-химия углей».

Для контактов: Эпштейн С.А., e-mail: apshtein@yandex.ru.

### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

S.A. Epshtein<sup>1</sup>, Dr. Sci. (Eng.), Head of Laboratory, e-mail: apshtein@yandex.ru,

I.M. Nikitina<sup>1</sup>, Cand. Sci. (Eng.), Leading Engineer,

K.V. Agarkov<sup>1</sup>, Engineer,

V.G. Nesterova<sup>1</sup>, Cand. Sci. (Eng.), Leading Engineer,

V.I. Minaev<sup>1</sup>, Cand. Sci. (Eng.), Leading Engineer,

<sup>1</sup> National University of Science and Technology «MISIS», Scientific and Training Laboratory of Physics and Chemistry of Coals, 119049, Moscow, Russia.

Corresponding author: S.A. Epshtein, e-mail: apshtein@yandex.ru.



---

### РУКОПИСИ, ДЕПОНИРОВАННЫЕ В ИЗДАТЕЛЬСТВЕ «ГОРНАЯ КНИГА»

---

### ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТРЕБОВАНИЙ ОХРАНЫ ТРУДА, ТЕХНИКИ БЕЗОПАСНОСТИ И ПРОТИВОПОЖАРНОЙ ТЕХНИКИ НА СОВРЕМЕННЫХ ЦИФРОВЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОДСТАНЦИЯХ

(№ 1190/06–19 от 23.05.2019; 10 с.)

Пичуев Александр Вадимович<sup>1</sup> — канд. техн. наук, доцент,

Котрюмин К.А. — магистрант,

<sup>1</sup> МГИ НИТУ «МИСиС».

Рассмотрены актуальные вопросы обеспечения требований охраны труда, техники безопасности и противопожарной техники при проектировании и последующей эксплуатации современных цифровых подстанций нового поколения. Приведены основные положения международных и национальных стандартов и требований нормативно-технических документов. Рассмотрены специфические особенности построения и эксплуатации электрооборудования и программно-технического комплекса управления цифровой подстанции.

Ключевые слова: охрана труда, техника безопасности, противопожарная техника, цифровая подстанция.

### ENSURING REQUIREMENTS OF LABOR PROTECTION, SAFETY AND FIRE-FIGHTING EQUIPMENT TO MODERN DIGITAL ELECTRIC SUBSTATIONS

A.V. Pichuev<sup>1</sup>, Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor,

K.A. Kotryumin<sup>1</sup>, Master's Degree Student,

<sup>1</sup> Mining Institute, National University of Science and Technology «MISIS», 119049, Moscow, Russia.

The article deals with topical issues of ensuring the requirements of labor protection, safety and fire-fighting equipment in the design and subsequent operation of modern digital substations of the new generation. The main provisions of international and national standards and requirements of normative and technical documents are given. The specific features of construction and operation of electrical equipment and software and hardware control complex of digital substation are considered.

Key words: labor protection, safety, fire-fighting equipment, digital substation.