

УДК 622:542.943

ВЛИЯНИЕ ОБРАБОТКИ УГЛЯ СУСПЕНЗИЕЙ ДОМЕННОГО ШЛАКА НА ИЗМЕНЕНИЕ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОВЕРХНОСТИ

© 2023 г. Ю. Ф. Патраков^{1,*}, А. Е. Майоров^{1,**}, С. А. Семенова^{1,***}, Д. П. Кулик^{1,****}

¹ФГБУН Федеральный исследовательский центр Угля и углехимии СО РАН, Институт угля
650065 Кемерово, Россия

*e-mail: yupat52@gmail.com

**e-mail: majorov-ae@mail.ru

***e-mail: semlight@mail.ru

****e-mail: e-mail: kdp-sbras@mail.ru

Поступила в редакцию 02.02.2023 г.

После доработки 23.03.2023 г.

Принята к публикации 07.06.2023 г.

Исследованы свойства и эффективность твердо-жидкой суспензии на основе молотого доменного шлака, используемой для дезактивации процессов окисления и самовозгорания углей. Установлено, что последовательная пропитка угля водорастворимыми и сгущенными компонентами суспензии шлака способствует равномерной пассивации и снижению окислительной активности внешней контактирующей поверхности. Полученные результаты являются обоснованием эффективности применения шлаковых отходов в составе технологических суспензий для изоляционного тампонажа угольного пласта.

Ключевые слова: уголь, низкотемпературное окисление, самонагревание, дезактивация поверхности, доменный шлак, суспензия, фильтрация, фильтр

DOI: 10.31857/S0023117723060063, EDN: BRCVCY

При вскрытии и отработке месторождений угля с применением высокопроизводительных выемочных технологий угольный пласт из нативного неизбежно превращается в активирующуюся трещиновато-пористую среду. Дестабилизация и активация поверхности угля при контакте с кислородом в определенных условиях приводят к развитию процессов низкотемпературного окисления с формированием очагов подземного самонагревания, что оказывает влияние на эффективность и безопасность угледобычи [1, 2]. Особую категорию представляют трудноизвлекаемые запасы углей, залегающие в сложных горно-геологических, горнотехнических и гидрогеологических условиях. Такие угольные пласты характеризуются наличием тектонических и техногенных нарушений, сложной гипсометрией, повышенной газоносностью, трещиноватостью, петрографической неоднородностью, склонностью к окислению и эндогенному самонагреванию и т.д. [3, 4]. Поэтому проблема управления физико-химическим состоянием пластов, в особенности, с трудноизвлекаемыми запасами углей, в процессе техногенного воздействия является важной и актуальной.

Разработке методов борьбы с самовозгоранием угля в шахтах посвящены многочисленные исследования [5–7]. В основных нормативных документах [8, 9] отражены базовые мероприятия по локализации и дезактивации эндогенных участков за счет охлаждения, герметизации и снижения химической активности трещиновато-пористой среды угля. К ним относятся: возведение перемычек, изоляционных рубашек и полос из твердеющих материалов, прекращающих приток воздуха к погашаемой части горных выработок и обрабатываемому пласту; пропитка нарушенного пласта водой или водными растворами ингибиторов – хлористым кальцием, аммонием, карбамидом, мочевиной, гашеной известью и др.; обработка аэрозолями или порошкообразными антипирогенами – серноокислым аммонием, фосфатами аммония, инертными газами, стабилизированными пенами; тампонаж нарушений химическими активными суспензиями, гелями, пастами.

Дезактивация вскрытого угольного массива также возможна посредством прямого воздействия на участок пласта химически активными технологическими суспензиями (ТС). В качестве герметизирующего и упрочняющего тампонажа трещин массива горных пород положительно се-

бя зарекомендовали нестабильные твердо-жидкие суспензии на основе цементов [10, 11] с добавлением активных минеральных наполнителей в виде зол, доменных шлаков и геополимерных материалов [12–14]. Однако данные работы не всегда учитывают специфические особенности и характеристики угольного пласта: газоносность, трещиноватость, текстуру, физико-химические свойства поверхности угля, склонность к самопроизвольному возгоранию и т.д.

Отметим, что до настоящего времени технология тампонажа суспензиями на основе минеральных наполнителей для угольного пласта практически не применялась из-за отсутствия эффективного состава смеси и научного обоснования его влияния на процессы окисления и смачиваемость поверхности угля. Поскольку процесс тампонажа трещин в массиве неизбежно сопровождается отфильтровыванием жидкой фазы, а фильтрат ТС химически активен и имеет более высокую проникающую способность, представляет определенный интерес оценить его влияние на дезактивацию вскрытой угольной поверхности.

Ранее нами было рассмотрено влияние растворимых компонентов жидкой фазы на изменение химического состава, смачиваемости поверхности и плотности ее покрытия изолирующим минеральным составом на примере суспензии цементного раствора. В рамках расширения сырьевой базы для производства ТС с учетом поиска более дешевых компонентов в качестве активных наполнителей целесообразно использовать минерализованные отходы производств, в частности молотые доменные шлаки, традиционно потребляемые для производства цементов (ГОСТ 3476-2019). Цементы и шлаки являются базовыми компонентами для составов, используемых в горном деле, а их влияние на физико-химическое состояние угольного пласта – открытая и до настоящего времени нерешенная задача.

Цель работы – исследование влияния обработки угля суспензией доменного шлака на изменение химического состава и смачиваемости контактирующей поверхности.

МЕТОДИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

В данной работе воспроизводится методология, используемая ранее для оценки дезактивации вскрытой поверхности угля суспензией цементного раствора [15]. Соблюдение единой методологии необходимо для осуществления сравнительного анализа используемых дезактивирующих смесей и выдачи рекомендательных указаний для их использования.

В качестве образца для исследования использован низкометаморфизованный уголь марки Д (длиннопламенный) Канско-Ачинского месторож-

дения (Хакасия) с характеристиками, %: влага общая W^r 9.5, влага аналитическая W^a 4.2, зольность A^d 6.5, выход летучих веществ V^{daf} 43.5. Выбор образца обусловлен особой чувствительностью каменного угля данной стадии метаморфизма к окислению кислородом воздуха в условиях добычи, хранения и транспортировки.

Поскольку тампонаж и изоляция угольного пласта ТС, как правило, сопровождаются формированием и раскрытием новых трещин, в данной работе представлен сравнительный анализ результатов взаимодействия поверхности угля с активными компонентами суспензии доменного шлака с привлечением как нативных углей, так и образцов данных углей, контактировавших с кислородной средой. Для этого использованы бесконтактные с воздухом методы отбора, доставки и разделки пробы. Пробу угля отбирали со свежесобранной поверхности угольного пласта в виде крупных кусков (150–200 мм). Образцы помещали в герметично закрывающийся, заполненный инертным газом пластиковый контейнер. Таким образом, обеспечивали минимальный контакт угля с атмосферным кислородом и исключали неконтролируемое окисление основной массы отобранной пробы. При доставке в лабораторию контейнер с углем через приемный шлюз помещали в заполненный инертным газом (азот особой чистоты ТУ 2114-003-05758954-2007) перчаточный бокс. В герметичном перчаточном боксе в чистой инертной газовой среде производили распаковку угля и все подготовительные операции для анализа нативного угля: откалывание с поверхности кусков слоя контактировавшего с воздухом угля, измельчение, рассев по классам крупности, взвешивание, смешивание порошка угля с КВг для подготовки пробы к ИК-спектральному анализу и т.д.

Для сравнительных исследований отделенные с торцов монолитных образцов фрагменты угля извлекали из перчаточного бокса и производили пробоподготовку в условиях воздушной атмосферы лаборатории, близкой к стандартной ($T = 20 \pm 5^\circ\text{C}$, влажность воздуха $60 \pm 2\%$, ГОСТ 8719-90).

Микрофотографии поверхности углей и элементный состав получали на сканирующем электронном микроскопе JEOL-6390LA в режиме регистрации обратно рассеянных электронов (контраст, в котором проявляется зависимость от атомного номера элемента), вторичных электронов (основа топографического контраста) и характеристического рентгеновского излучения (картирование химических элементов).

Элементный состав поверхности образцов определяли с помощью энергодисперсионного детектора рентгеновского излучения JED 2300 (разрешение 133 эВ). Расчет процентного содержания каждого элемента в анализируемом веще-

стве проводился по полученным спектрам рентгеновского излучения с помощью программного обеспечения *Analysis Station* версии 3.62.07. компании *JEOL Engineering* с использованием нестандартного метода *ZAF*.

Кислородсодержащие группы анализировали рН-метрическим методом (рН-метр 150МИ, Россия): суммарную кислотность (ОН + СООН) — ионным обменом с гидроксидом натрия; карбонильные — по реакции с гидроксиламином солянокислым. Перед анализом кислородсодержащих групп в угле, обработанном шлаковым фильтратом, уголь предварительно отмывали от минеральных остатков дистиллированной водой до нейтральной реакции и высушивали до постоянного веса при 70°C в инертной атмосфере.

ИК-спектры регистрировали на инфракрасном фурье-спектрометре “Инфралюм” с использованием приставки диффузного отражения “EasyDIFF”. ИК-спектральный параметр *HI* (индекс гидрофильности) рассчитывали по отношению суммы интенсивностей полос поглощения гидроксильных (3400 см⁻¹) и карбоксильных (1710 см⁻¹) групп к сумме интенсивностей полос поглощения СН-ароматических (3040 см⁻¹) и СН₂-алифатических (2920 см⁻¹) групп: $HI = (2D_{3400} + D_{1710}) / (D_{3040} + D_{2920})$ [16].

Оценку смачиваемости угля проводили по методу фильтрации с помощью модернизированной методики оценки скорости поглощения жидкости слоем угольного порошка (модель фиктивного грунта) с учетом изменения давления на границе жидкость-газ в слое угля по методике [17]. Порошок угля (фракция 0.1–0.2 мм, масса 25 г) размещали в вертикальной трубке (диаметр 40 мм), сообщаемой тонким гибким шлангом с цилиндрической емкостью, заполненной фильтруемой жидкостью (рис. 1). Поскольку визуально оценить высоту смачивания черного порошка угля водой весьма затруднительно, то в отличие от способа [17] оценивали не высоту подъема жидкости в слое угля, а увеличение массы пробы угольного порошка [15]. Напорное давление фильтруемой жидкости непрерывно увеличивали со скоростью 10 мм вод. ст./мин. Измерения массы угля при насыщении жидкостью регистрировали до полного его смачивания или до достижения постоянных значений на весах. Фильтрацию жидкости через слой угля осуществляли непосредственно после измельчения пробы в инертной или воздушной среде.

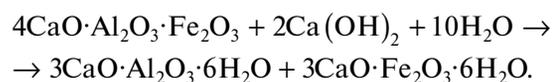
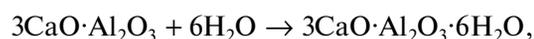
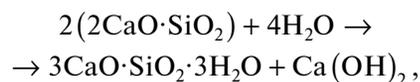
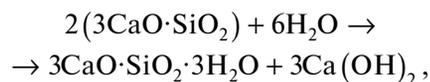
Учитывая необходимость применения ТС стабильного качества при угледобыче в промышленных объемах, для приготовления фильтруемой жидкости с ингибирующими свойствами использован шлак доменный гранулированный молотый (сертифицированный продукт многотоннажного производства ООО “Мечел-Материала-

лы”, г. Челябинск, ТУ 0799-001-99126491-2013). Характеристики: влага 0.3%, фракция <0.08 мм. Водно-шлаковые смеси готовили при соотношении Т : Ж = 1 : 10 (10%-я суспензия) и 1 : 2 (50%-ная суспензия). После осаждения в течение 30 мин твердых нерастворимых частиц суспензии для дальнейших испытаний на смачивание поверхности угля использовали верхний слой жидкости (фильтрат). В качестве эталонной жидкости для фильтрации использовали бидистиллированную воду.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Шлак для приготовления суспензии представляет собой тонкодисперсный материал, полученный путем тонкого измельчения гранулированного доменного шлака. Химический состав шлака приведен в табл. 1. Основными элементами, входящими в состав компонентов шлака, являются кремний, алюминий, кальций и магний. В количествах менее 1 мас. % присутствуют сера, калий, натрий, титан и железо.

При взаимодействии с водой безводные оксиды шлака могут превращаться в гидросиликаты, гидроалюминаты, гидроферраты и гидроксиды кальция [18]:



Содержание растворимых компонентов шлака в фильтратах 10 и 50%-й суспензий составляет 1.41 и 3.47 г/л соответственно. Вследствие протекания гидролитических реакций водные растворы шлака имеют слабощелочную среду с рН = 9.8–10.2.

Наличие на внешней поверхности частиц низкометаморфизованного угля химически активных кислородных групп различной полярности, а также изменение их количества в зависимости от продолжительности контакта с окружающей средой оказывают влияние на его чувствительность к смачиваемости водой и техническими реагентами. Процесс смачивания угольного слоя фильтратом шлаковых суспензий по методике [17] протекает однонаправленно со смачиванием порошка угля водой, но различается по интенсивности. На начальном этапе при использовании низкого давления напора жидкости интенсивность фильтрации минерализованных фильтратов шла-

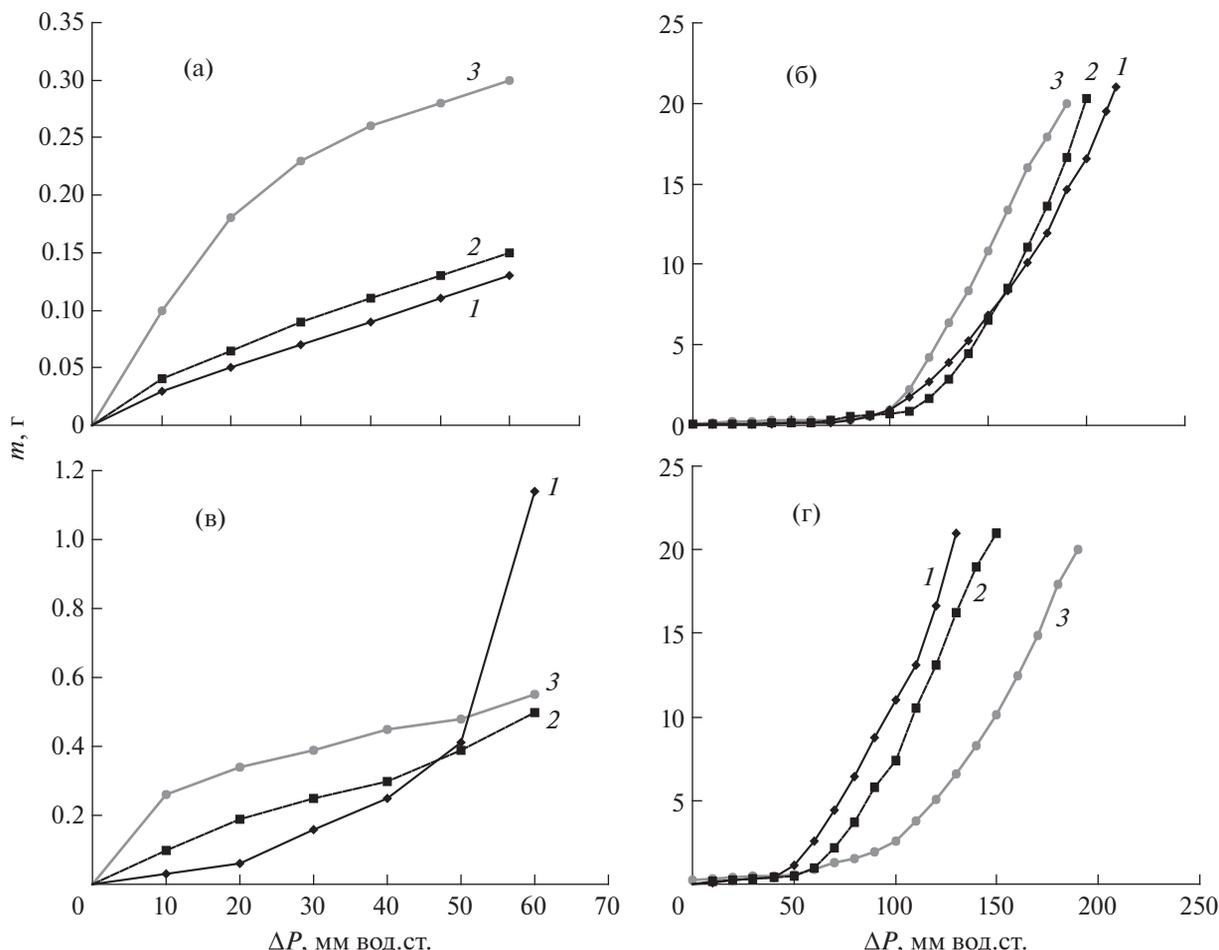


Рис. 1. Интенсивность фильтрации воды (1) и фильтратов 10%-ной (2) и 50%-ной (3) суспензий шлака через слой порошка нативного (а), (б) и поверхностноокисленного (в), (г) углей марки Д.

ка превосходит интенсивность фильтрации воды (рис. 1, а, в).

Лучшая смачиваемость на начальном этапе фильтрации минерализованными растворами

слоя угля (рис. 1, а, в), по-видимому, обусловлена возможностью образования различного рода химических и физико-химических взаимодействий между растворимыми компонентами шлака и по-

Таблица 1. Элементный состав исследуемых образцов шлака и угля

Образец	Содержание элементов, мас. %											
	C	O	Na	Mg	Al	Si	P	S	K	Ca	Ti	Fe
Шлак доменный	11.0	46.34	0.26	5.3	4.24	11.1	—	0.93	0.48	19.5	0.67	0.19
Уголь	74.12	23.59	0.06	0.06	0.83	0.82	0.1	0.22	0.05	0.06	0.02	0.08
Уголь, обработанный фильтратом 10%-ного р-ра шлака	72.33	24.81	0.13	0.06	0.28	0.13	0.12	1.02	0.05	1.01	0.02	0.05
Уголь, обработанный фильтратом 50%-ного р-ра шлака	57.93	32.71	0.2	0.23	0.88	0.66	0.10	3.35	0.11	3.73	—	0.1
Уголь, обработанный суспензией 50%-ного р-ра шлака	50.8	33.24	0.14	2.09	1.68	4.12	0.04	0.45	0.16	6.96	0.23	0.08
Уголь, последовательно обработанный фильтратом и суспензией 50%-ного р-ра шлака	33.88	39.09	0.17	3.02	2.37	6.22	0.07	1.77	0.28	12.61	0.37	0.13

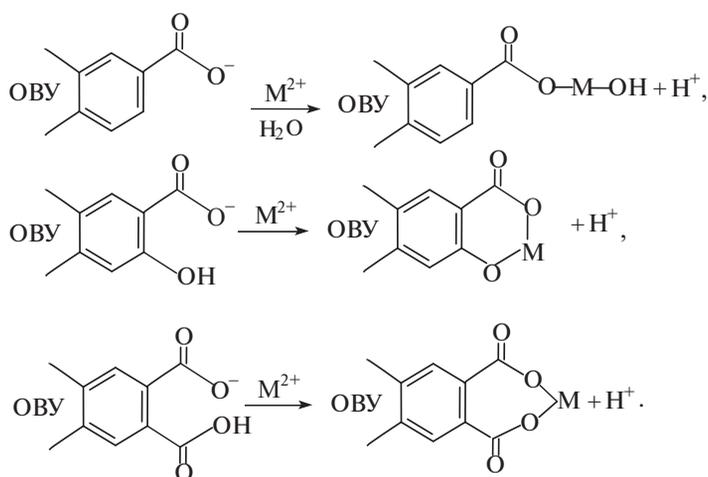
Таблица 2. Содержание кислородных групп в образцах угля до и после обработки шлаковым фильтратом

Концентрация шлаковой суспензии, %	Содержание кислородной группы, мг-экв/г		Показатель гидрофильности <i>HI</i> , отн. ед.
	ОН + СООН	С=О	
Нативный уголь			
0	0.39	1.88	4.05
Поверхностноокисленный уголь			
0	0.52	1.50	4.52
10	0.19	1.16	—*
50	0.17	1.14	—

*Не определяли.

верхностными функциональными группами угля. Анализ изменения содержания О-групп в углях до и после обработки фильтратами (табл. 2) показывает, что концентрация как (ОН+СООН), так и С=О-групп в органическом веществе углей (ОВУ) после взаимодействия с активными ком-

понентами фильтрата уменьшается. Вероятно, результатом взаимодействия минерализованных щелочных фильтратов и ОВУ является замещение протонов функциональных О-групп угля на катионы минеральных компонентов шлака (M^{2+}) с образованием органоминеральных комплексов [19]:



Уменьшение концентрации карбонильных групп возможно в результате их доокисления щелочами до карбоксильных (как в случае альдегидных). Протоны карбоксильных групп далее по аналогии с протонами фенольных гидроксидов также, по-видимому, могут замещаться на катионы минеральных компонентов шлака (M^{2+}). Учитывая, что фенольные и карбонильные группы углей являются весьма активными в реакциях естественного окисления, замещение их на атомы минеральных компонентов может способствовать снижению окислительной активности и дезактивации углей при взаимодействии с кислородом воздуха.

Проницаемость угольного слоя на раннем этапе фильтрации обусловлена действием капиллярных сил, не требует избыточного давления. Даль-

нейший темп фильтрации жидкости в слое угольного порошка определяется как гидрофобностью контактирующей поверхности угольных частиц и степенью ее взаимодействия с фильтруемой жидкостью, так и заполнением пористой среды продуктами гидратации (кристаллами солей) и взвешенными частицами при движении фронта жидкости [17, 20].

Фильтрация воды через слой нативного угля, не контактировавшего ранее с кислородом, идет с большим сопротивлением, чем в случае поверхностноокисленного угля, прошедшего пробоподготовку (измельчение, рассев) в воздушной среде (рис. 1, б, г). Объяснением этому может служить принудительная окислительная гидрофилизация поверхности угольных частиц при измельчении угля в присутствии кислорода. Результатом окислительной активации является перераспределение

функционального состава О-групп с увеличением доли полярных гидрофильных групп кислого характера (ОН + СООН) и снижением доли нейтральных карбонильных групп (табл. 2). Подтверждением этому может служить повышение значительного показателя гидрофильности поверхности HI , отражающего отношение суммарного содержания полярных кислородсодержащих групп (гидроксильных и карбоксильных) к количеству углеводородных фрагментов ОВУ в поверхностном слое контактировавшего с кислородом угля, по данным ИК-спектрального анализа (табл. 2).

По сравнению с фильтрацией воды смачивание нативного угля шлаковыми растворами протекает в области пониженного давления напора жидкости (рис. 1, б). При использовании поверхностно-окисленного угля интенсивность фильтрации шлаковых растворов по отношению к воде, напротив, замедляется (рис. 1, г). При этом стоит отметить, что принципиальные различия в интенсивности фильтрации для углей с различной гидрофильностью поверхности отмечены лишь по отношению к дистиллированной воде. В случае фильтрации жидкости на основе 50%-ной водно-шлаковой смеси интенсивность процесса практически не зависит от окисленности поверхности угля и заканчивается при давлении напора жидкости ~170 мм вод.ст. (рис. 1, б, г). Возможно, этому способствует отложение на поверхности угля и открытых угольных порах взвешенных частиц, препятствующих свободному току минерализованной жидкости. Также полагаем, что из-за возникновения взаимодействий между растворимыми компонентами шлака с кислыми группами ОВУ на поверхности угля формируются кристаллические отложения солей, также оказывающие сопротивление движению жидкости. При этом процесс фильтрации воды, не отягощенной присутствием взвешенных и растворенных солей, вероятно, в большей степени зависит от полярных свойств поверхности угля.

Минеральный состав поверхности угля после пропитки фильтратом шлака также претерпевает изменения (табл. 1). Так, в поверхностном слое угля, обработанного шлаковыми фильтратами, отмечается заметное увеличение содержания кальция и серы, доля которых растет по мере увеличения концентрации раствора. Присутствие серы может быть связано с использованием серосодержащих компонентов в составе гидрофобизирующей добавки к шлаку.

В реальных условиях при нагнетании минерализующих составов в трещины вскрытого пласта с угольной поверхностью первоначально контактирует жидкая водная фаза ТС вследствие ее более высокой проникающей способности, вслед за которой продвигается фронт сгущенной цементирующей суспензии. Для оценки плотности по-

крытия поверхности угля минерализующими составами осуществляли пропитку монолитных образцов угля жидкими фильтратами и сгущенной суспензией шлака с последующим микроскопическим анализом поверхности.

При обработке водными растворами шлака поверхность угля равномерно покрывается иглоподобными кристаллическими частицами (рис. 2, а, б), плотность покрытия которыми возрастает с увеличением концентрации раствора. Обработка угля концентрированной шлаковой суспензией обеспечивает менее равномерное покрытие поверхности (рис. 2, в). Слабая степень адгезии сгущенной суспензии с угольной поверхностью может быть обусловлена как низкой цементацией и гидратацией нерастворимых неорганических соединений шлака, так и их плохим сродством (адгезией) с органической поверхностью угля. В элементном составе реагирующей угольной поверхности при этом существенно возрастает доля кальция, магния, алюминия и кремния (табл. 1).

Принципиально иной результат получается при обработке концентрированной шлаковой суспензией поверхности угля, предварительно пропитанной фильтратом. В данном случае достигается наиболее равномерное и плотное распределение частиц минеральных компонентов шлака по реагирующей угольной поверхности (рис. 2, г).

Неоднозначные изменения химического состава (табл. 1) и картины покрытия поверхности угля минеральными компонентами фильтрата и суспензии шлака (рис. 2) объясняются следующим. При обработке угля слабоконцентрированным водным фильтратом шлака процесс взаимодействия с угольной поверхностью, по-видимому, связан с химическими реакциями водорастворимых соединений с поверхностными О-группами угля с образованием органоминеральных комплексов. При этом на поверхности угля наблюдается формирование игольчатых частиц с пространственной конфигурацией игл в розетки (рис. 2, б). Вероятно, эти кристаллы образованы из водорастворимых соединений кальция (например, сульфата или гидроалюмината кальция). Из концентрированной суспензии кристаллы солей осаждаются в виде пластинок с ромбовидными формами (рис. 2, в, г). Можно полагать, что первоначально сформированные на поверхности угля кристаллы игольчатой формы являются центрами дальнейшей кристаллизации за счет образования пространственных связей с другими неорганическими соединениями шлака. Иными словами, последовательная обработка слабым и концентрированным раствором шлака позволяет обеспечить более плотную степень покрытия поверхности угля минерализующим составом.

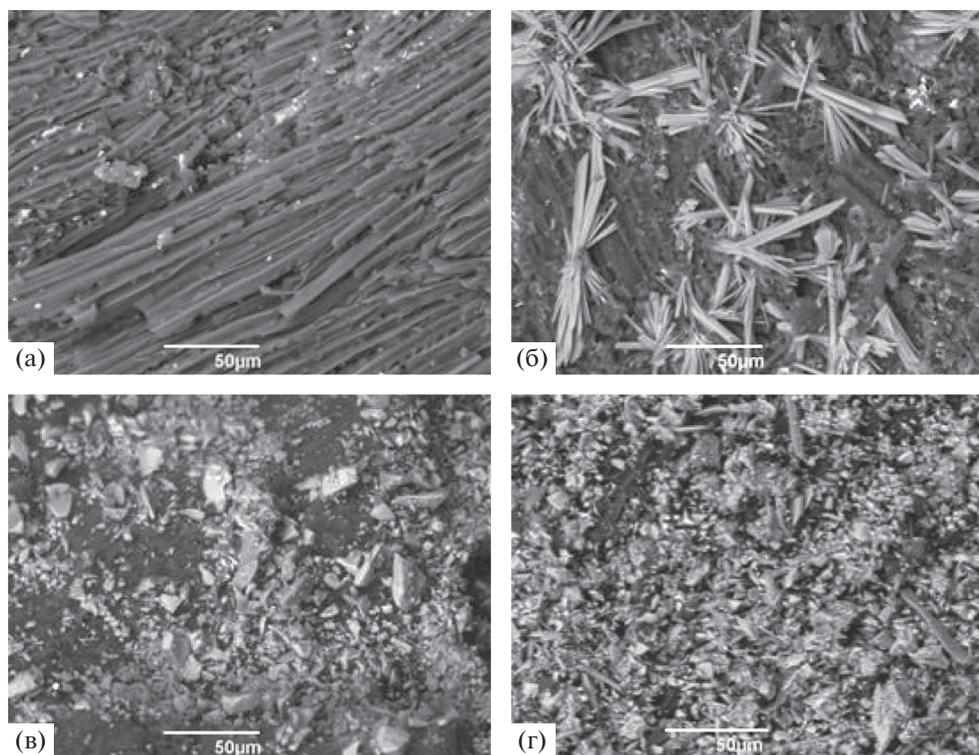


Рис. 2. Микрофотографии поверхностей торцевых граней монолитных кусочков угля марки Д: исходного (а), пропитанных фильтратом (б), суспензией (в) 50%-ного раствора доменного шлака и обработанных последовательно фильтратом и суспензией (г).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установлено, что пропитка низкометаморфизованного угля фильтратом шлакового раствора способствует равномерному покрытию изолирующим антиоксидантным составом его поверхности, а также приводит к снижению в его составе количества периферийных кислородных групп (карбокислых, гидроксильных, карбонильных) с образованием органоминеральных комплексов, что может способствовать снижению окислительной активности внешней контактирующей поверхности.

Неравнозначная плотность закрепления на поверхности угля водорастворимых и водонерастворимых составляющих шлаковой суспензии дает основание полагать, что в условиях закачки ТС в угольный пласт с целью дезактивации обнаженной поверхности, закрепление твердых частиц суспензии осуществляется на центрах кристаллизации, сформированных посредством модифицирования угольной поверхности химически активной жидкой фазой (фильтратом).

Точки закрепления твердых частиц и пассивации поверхности являются центрами формирования каркаса, обеспечивающего при последующей гидратации и отверждении ТС заполнение трещины в угле и адгезионное соединение.

Полученные результаты обосновывают целесообразность применения доменных шлаков в качестве активных наполнителей в составе минеральных ТС и необходимость развития дальнейших исследований по созданию дешевых и эффективных составов для инъекционной локализации и дезактивации зон самонагрева угля при подземной отработке пласта в сложных условиях.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность за помощь в выполнении физико-химических методов анализа Созинову С.А. (ЦКП ФИЦ УУХ СО РАН), А.В. Ярковой, Т.А. Папиной и А.В. Аникиной (ИУ ФИЦ УУХ СО РАН).

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках государственного задания ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр угля и углехимии Сибирского отделения Российской академии наук» проект FWEZ-2021-0002 «Разработка эффективных технологий добычи угля роботизированными горнодобывающими комплексами без постоянного присутствия людей в зонах ведения горных работ, систем управления и методов оценки технического состояния и диагностики их ресурса и обоснова-

ние обеспечения воспроизводства минерально-сырьевой базы” (рег. № АААА-А21-121012290021-1).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Саранчук В.И.* Окисление и самовозгорание угля. Киев: Наукова думка, 1982. 166 с.
2. *Onifade M., Genc B.* // Intern. J. Mining Sci. Technol. 2020. V. 30. P. 303.
<https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2020.03.001>
3. *Шлапаков П.А., Ерастов А.Ю., Хаймин С.А.* // Вест. Научного центра ВостНИИ по промышленной и экологической безопасности. 2019. № 1. С. 14.
<https://doi.org/10.25558/VOSTNII.2019.69.88.002>
4. *Миронов К.В.* Справочник геолога-угольщика. М.: Недра, 1991. 363 с.
5. *Kong B., Li Z., Yang Y., Liu Z., Yan D.* // Environ. Sci. Pollut. Res. V. 24. P. 23453.
<https://doi.org/10.1007/s11356-017-0209-6>
6. *Kumar Singh R.V.* // Proc. Eng. 2013. V. 62. P. 78.
<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.08.046>
7. *Lu W., Cao Y.J., Tien J.C.* // Intern. J. Mining Sci. Technol. 2017. V. 27. P. 839.
<https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2017.07.018>
8. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности “Инструкция по определению инкубационного периода самовозгорания угля”. Сер. 05. Вып. 38. М: ЗАО НТЦ ПБ, 2013. 22 с.
9. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности “Инструкция по предупреждению эндогенных пожаров и безопасному ведению горных работ на склонных к самовозгоранию пластах угля”. Сер. 05. Вып. 46. М: ЗАО НТЦ ПБ, 2016. 56 с.
10. *Майоров А.Е., Хямляйнен В.А.* // Изв. ВУЗов. Горный журн. 2010. № 4. С. 105.
11. *Zhu D., Guo Yu, Wang W., Guo G., An T.* // Adv. Civ. Eng. 2019. V. 6. 10 p.
<https://doi.org/10.1155/2019/2495850>
12. *Phoo-ngernkham T., Sata V., Hanjitsuwan S., Ridthirud Ch., Hatanaka Sh., Chindaprasirt P.* // Constr. Build. Mater. 2015. V. 98. P. 482.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.08.139>
13. *Li Sh., Sha F., Liu R., Li W.* Properties of cement-based grouts with high amounts of ground granulated blast-furnace slag and fly ash // J. Mater. Civ. Eng. 2017. V. 29. № 11.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0002083](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002083)
14. *Zivica V., Palou M.T., Krizma M.* // Build. Res. J. 2014. V. 61. 85e100.
<https://doi.org/10.2478/brj-2014-0007>
15. *Патраков Ю.Ф., Семенова С.А., Майоров А.Е., Созинов С.А.* // Кокс и химия. 2022. № 1. С. 2. [*Patra-kov Yu.F., Semenova S.A., Majorov A.E., Sozinov S.A.* // Coke and Chemistry, 2022, vol. 65, no. 1, p. 1. <https://doi.org/10.3103/S1068364X22010045>.
https://doi.org/10.52351/00232815_2022_01_2
16. *Jena M.S., Biswal S.K., Rudramuniyappa M.V.* // Int. J. Miner. Proc. 2008. V. 87. P. 42.
<https://doi.org/10.1016/J.MINPRO.2008.01.004>
17. *Зимон А.Д.* Адгезия жидкости и смачивание. М: Химия, 1974. 416 с.
18. *Райхель В., Конрад Д.* Бетон: Ч. 1. Свойства. Проектирование. Испытание. М: Стройиздат, 1979. 111 с.
19. *Stevenson F.J.* Humus Chemistry: Genesis, Composition, Reactions. New York: John Wiley&Sons, 1994. 443 p.
20. *Гудок Н.С.* Изучение физических свойств пористых сред. М.: Недра, 1970. 208 с.