

ГОРЕНИЕ, ВЗРЫВ И УДАРНЫЕ ВОЛНЫ

УДК 662.61+620.98

НЕЙТРАЛИЗАЦИЯ СОЕДИНЕНИЙ СЕРЫ ПРИ ФИЛЬТРАЦИОННОМ ГОРЕНИИ БУРЫХ УГЛЕЙ С МИНЕРАЛЬНЫМИ ДОБАВКАМИ

© 2021 г. В. М. Кислов^{1*}, Ю. Ю. Цветкова¹, М. В. Цветков¹,
Е. Н. Пилипенко¹, М. В. Салганская^{1,2}

¹Институт проблем химической физики Российской академии наук, Черноголовка, Россия

²Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

*E-mail: vmkislov@icp.ac.ru

Поступила в редакцию 12.11.2020;

после доработки 09.12.2020;

принята в печать 21.12.2020

Исследована газификация сернистого бурого угля с добавлением до 50 мас.% минеральной компоненты. В качестве минеральной компоненты использовали фарфоровые кольца Рашига, играющие роль химически инертного теплоносителя или частицы мрамора, которые дополнительно к этому реагируют с серосодержащими соединениями. Определены теплоты сгорания газообразных продуктов и содержание серы в зольном остатке в зависимости от вида и доли добавки, введенной в газифицируемый материал. С помощью рентгенофазового анализа показано, что в твердом остатке горения соединения серы находятся в виде сульфида и сульфата кальция. Установлено, что добавка 50 мас.% мрамора ведет к увеличению доли серы в зольном остатке в ~3 раза — до 37% от исходного содержания серы. Добавление 50 мас.% инертного наполнителя в шихту повышает температурный режим фильтрационного горения (с 1270 до 1400°C), в результате чего соединения серы переходят из твердой фазы в газовую фазу.

Ключевые слова: поглощение серосодержащих соединений, фильтрационное горение, бурый уголь, мрамор.

DOI: 10.31857/S0207401X21080057

ВВЕДЕНИЕ

Сера содержится во всех видах твердых топлив, таких как каменные и бурые угли, горючие сланцы, а также и в некоторых видах торфа. Но если содержание серы в торфе обычно не превышает 1.2%, то в углях оно может составлять до 10%, а в некоторых видах сланцев — до 12–14% [1, 2].

Содержащаяся в топливе в относительно небольшом количестве (до 1.5%) сера является нежелательной, а при больших количествах — вредной частью топлива. При термической переработке твердых топлив сера выделяется в виде газообразных соединений (в восстановительной атмосфере преимущественно в виде H_2S и COS , а в окислительной — SO_2), загрязняя и отравляя окружающую среду, и вызывая коррозию металлических конструкций, соприкасающихся с газообразными продуктами сгорания [3]. Именно поэтому при выборе путей использования тех или иных твердых топлив решающим фактором нередко оказывается содержание в них серы [4].

Угли Подмосковского бассейна главным образом относятся к бурым углям марки Б2 и характеризуются высоким содержанием серы — до 10%,

т.е. относятся к сернистым (2.5–4.0% серы) и высокосерным (более 4.0% серы) топливам. Угли этой группы отличаются преобладанием сульфидной серы: главным образом в виде пирита (FeS_2), халькопирита ($CuFeS_2$) и марказита (полисульфида железа, FeS_2); также в них в заметном количестве присутствуют сероорганические соединения [5]. При пиролизе угля может быть получено до 10–12% жидких продуктов и 15–20% газа. Зольность углей колеблется в пределах от 20 до 35%, характерной чертой их является высокое содержание оксидов алюминия и железа. Теплота сгорания сухих углей по бассейну колеблется от 11 до 17 МДж/кг [6].

Отчасти проблему выбросов вредных газов помогают решить используемые на промышленных предприятиях различные системы газоочистки, в том числе от соединений серы, однако они довольно дороги и громоздки [7]. В связи с этим в настоящее время идет поиск более простых и дешевых способов нейтрализации кислотных газов. Существуют различные способы газификации твердых топлив [8]; одним из них является исследуемый в ИПХФ РАН способ, в котором в перерабатываемый ма-

Таблица 1. Элементный анализ угля и его золы

Материал	Элементный состав, %					Содержание золы, %	Теплота сгорания Q , МДж/кг
	С	Н	О	N	S		
Уголь	42.57	3.82	23.13	0.78	2.70	27.00	13.0
Твердый остаток	0.14	0.08	—	0	1.18	98.60	—

териал добавляют кальцийсодержащие сорбенты для нейтрализации кислых газов непосредственно при газификации топлива [9]. Так, например, было показано, что добавка кальцийсодержащих сорбентов в шихту позволяет улавливать до 80% содержащихся в ней соединений хлора [10, 11]. Образующиеся при этом хлориды щелочных и щелочноземельных металлов остаются в зольном остатке и экологической опасности не представляют. Цель работы – экспериментальное исследование закономерностей поглощения серосодержащих газов кальцийсодержащими сорбентами при фильтрационном горении углей Подмосковского угольного бассейна.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В качестве топлива был выбран сернистый бурый уголь Подмосковского бассейна – тульский уголь Кимовского разреза. В качестве твердой добавки в одной серии экспериментов использовали химически инертные фарфоровые кольца Рашига, фракция 5–10 мм. В другой серии экспериментов использовали частицы мрамора, фракция 3–7 мм. Анализ химического состава мрамора показал, что он состоит из CaCO_3 и не имеет посторонних включений. Выбор мрамора в качестве поглощающей добавки обусловлен тем, что согласно результатам работ [10, 11] он является наименее реакционноспособным по сравнению с другими широко распространенными видами кальцийсодержащих поглотителей кислых газов, поэтому полученные результаты независимо от масштаба используемой нами экспериментальной установки позволят получить оценку нижнего предела эффективности поглощения серосодержащих газов и избежать необоснованного завышения оценки эффективности поглощения серы данным способом.

Элементный анализ угля, жидких продуктов и твердого остатка горения проводили методом сжигания в потоке кислорода на CHNS/O элементном анализаторе Vario MICRO cube, Elementar. Химический состав зольного остатка, а также мрамора, используемого в экспериментах, получили посредством анализа на сканирующем автоэмиссионном электронном микроскопе Zeiss LEO SUPRA 25, Carl Zeiss (табл. 1). Предварительно проведен технический анализ тульского

угля по: ГОСТ Р 52911–2013 “Топливо твердое минеральное. Определение общей влаги”, ГОСТ Р 55661–2013 “Топливо твердое минеральное. Определение зольности”, ГОСТ Р 55660–2013 “Топливо твердое минеральное. Определение выхода летучих веществ”. Для определения кристаллических фаз золу анализировали на настольном рентгеновском порошковом дифрактометре Aeris, Malvern PANalytical с рентгеновской трубкой с $\text{Cu}(K_\alpha)$ -излучением и размером шага 0.012° в диапазоне $2\theta = 5^\circ\text{--}85^\circ$. Для идентификации фаз использовали электронную базу данных ICDD – PDF-4+.

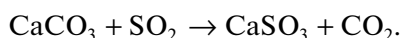
Анализ газообразных продуктов выполнен с помощью хроматографа Кристалл-5000.2, Хроматэк. Содержание серы в газообразных продуктах определяли из массового баланса по разности. Влажность угля составила 8%, выход летучих продуктов – 27%, выход кокса – 38%, зольность – 27%. Минеральная часть золы угля, полученной по ГОСТ Р 55661–2013, в пересчете на оксиды содержит: 46.0% Al_2O_3 , 32.3% SiO_2 , 2.1% CaO , 18.8% Fe_2O_3 , содержание прочих компонентов в сумме составляло 0.8%.

Процессы в газификаторе шахтного типа

В реакторе фильтрационного горения реализуется несколько характерных зон [12]. В верхней части реактора находится зона сушки и нагревания ($20\text{--}200^\circ\text{C}$). В этой зоне исходная шихта постепенно нагревается потоком восходящего продукт-газа, который в свою очередь охлаждается. Ниже располагается зона пиролиза ($200\text{--}800^\circ\text{C}$), в которой органическая часть топлива, нагреваемая потоком газа, подвергается пиролизу, образуя кокс, газообразные и жидкие продукты пиролиза. Еще ниже располагается зона горения ($800\text{--}1200^\circ\text{C}$), где сгорает кокс и потребляется кислород из восходящего потока воздуха. В этой зоне водяной пар реагирует с коксом, образуя монооксид углерода и водород. В нижней части реактора находится зона охлаждения золы, где зольный остаток охлаждается, отдавая тепло восходящей паровоздушной смеси [13].

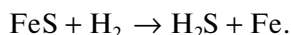
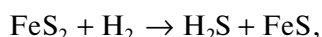
Основная идея метода поглощения серосодержащих газов заключается в добавлении щелочного

сорбента к шихте, загружаемой в противоточный реактор-газификатор. В верхних слоях шихты поглощение серосодержащих газов идет в соответствии со следующими реакциями (на примере карбоната кальция):

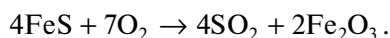


Организация зон в реакторе создает благоприятные условия для нейтрализации соединений серы. В верхней зоне температура невысока и создаются условия, когда пары воды и сероводород или диоксид серы конденсируются на холодной поверхности свежезагруженных частиц шихты. Образующиеся кислоты (сероводородная и сернистая) могут при этом нейтрализоваться минеральными компонентами шихты, в том числе специально добавленными щелочными сорбентами. В зонах пиролиза и сушки поток газа фильтруется через шихту, обеспечивая взаимодействие потока газа с поверхностью сорбента.

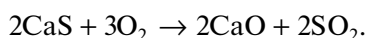
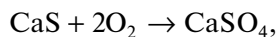
Органическая сера в восстановительной зоне пиролиза превращается в сероводород (H_2S) и сероокись углерода (COS). Пиритная сера (дисульфид железа) в восстановительной зоне пиролиза при температуре 400°C превращается в сульфид железа с выделением сероводорода, а при температурах выше 500°C сульфид железа может восстанавливаться до металлического железа [14]:



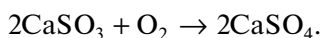
В окислительной зоне горения сера из оставшегося сульфида железа при температурах выше 550°C полностью превращается в оксид серы(IV) [15]:



Образующийся при нейтрализации H_2S сульфид кальция при прохождении фронта горения частично окисляется в оксид и сульфат кальция, причем количество образующегося оксида и сульфата кальция зависит от температуры горения [16]:



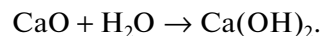
Сульфит кальция окисляется в сульфат кальция:



Сульфат кальция при повышении температуры выше 1200°C начинает разлагаться на оксид кальция и диоксид серы:



В зоне охлаждения происходит остывание зольного остатка, а при паровоздушной газификации оксид кальция переходит в гидроксид кальция:



Сульфат кальция, сульфид кальция, оксид кальция, гидроксид кальция и непрореагировавший карбонат кальция выгружаются вместе с золой из нижней части реактора.

Описание установки

Эксперименты по исследованию нейтрализации серосодержащих газов с помощью добавок кальцийсодержащих сорбентов проводили в лабораторном вертикальном кварцевом реакторе периодического действия с внутренним диаметром 45 мм (рис. 1).

Загрузку газифицируемого материала осуществляли небольшими порциями послойно: вначале загружали порцию угля, затем — порцию негорючего материала, в результате чего в реактор было загружено 8–10 чередующихся слоев угля и негорючего материала. Насыпная плотность частиц тульского угля составляет $585 \pm 15 \text{ кг/м}^3$, колец Рашига — $880 \pm 20 \text{ кг/м}^3$ и частиц мрамора — $1070 \pm 20 \text{ кг/м}^3$. Насыпная плотность смесей угля и негорючего компонента практически линейно зависит от массовой доли добавки.

Экспериментальная установка состояла из реактора 1, в который загружали исследуемую шихту. На выходе реактора устанавливали смолоотделитель 2, принцип действия которого подробно описан в работе [17]. На выходе из смолоотделителя находилась двугорлая колба 3, в которой преимущественно осаждались жидкие продукты пиролиза.

Выходящая из колбы 3 парогазовая смесь поступает в водяной холодильник 4, на стенках которого оседают остатки смолы и капли воды, стекающие в приемную колбу 5. Далее по потоку находится барботажная колба 6 с 10%-ным водным раствором Na_2CO_3 для поглощения содержащихся в газовом потоке сернистых соединений.

После прогрева нижней части реактора 1 с помощью электроспиральи 9 в него начинали подавать воздух, что приводило к формированию волны горения, распространяющейся снизу вверх. Удельный расход воздуха в реактор во время эксперимента поддерживали постоянным — $550 \text{ м}^3/(\text{ч} \cdot \text{м}^2)$. Полученный продукт-газ сжигали в газовой горелке 7, для чего в нее подавали дополнительное количество воздуха. Отбор проб газообразных продуктов осуществляли на участке магистрали между барботажной колбой и горелкой.

В большинстве экспериментов температуру измеряли у стенки реактора с помощью хромель-алюмелевых термопар, в экспериментах с добав-

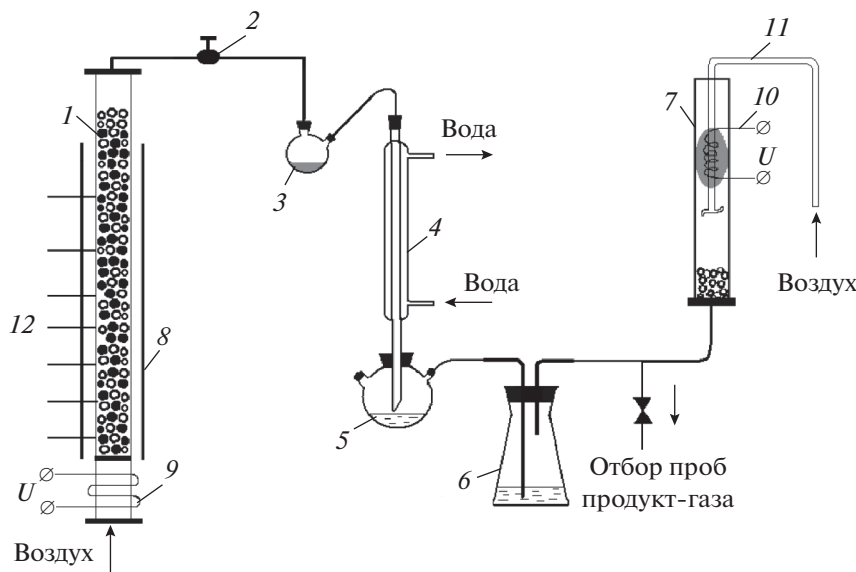


Рис. 1. Принципиальная схема экспериментальной установки: 1 – реактор, 2 – смолоотделитель, 3 – двугорлая колба, 4 – водяной ходоильник, 5 – трехгорлая колба, 6 – барботажная колба с 10%-ным водным раствором Na_2CO_3 , 7 – газовая горелка, 8 – теплоотражающий экран, 9 и 10 – электроспиральи, 11 – трубка подачи воздуха, 12 – термопары.

кой инертного теплоносителя также с помощью платинородий-платиновых термопар проводили измерение температуры по оси реактора. В ходе экспериментов периодически осуществляли отбор проб газообразных продуктов в проточные стеклянные ампулы.

При использовании в качестве твердой добавки инертного теплоносителя фарфоровые кольца после сгорания отделяли от золы угля, после чего золу взвешивали и анализировали. При использовании в качестве твердой добавки частиц мрамора анализировали размолотые в ступке вместе

частицы извести и золы.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Помимо высокого содержания серы проблемной исследуемого нами угля также является его достаточно высокая зольность (27%) и относительно невысокое содержание в нем углерода (43%), что не позволяет нам достаточно широко варьировать количество вводимой добавки без существенного ухудшения параметров газификации. При послойной загрузке в установившемся режиме даже при добавке 50% негорючей компоненты процесс идет стабильно, его параметры (массовая скорость горения по газифицируемому углю и состав газообразных продуктов) в ходе эксперимента почти не меняются.

При использовании инертного теплоносителя температура горения по оси реактора растет с 1270 (для угля без добавок) до 1400 °С (для добавки 50% инертного материала), что связано с аккумулярованием тепла фарфоровыми кольцами (рис. 2). Но из-за теплопотерь через стенки реактора температура горения на стенках реактора оставалась практически постоянной и составляла всего 910 °С [18]. Несмотря на то, что измеренные температуры горения были ниже, чем указанный в литературе диапазон температур плавления золы данного угля (1450–1500 °С) [6], при разгрузке наблюдали оплавление заметной части образующегося зольного остатка. По-видимому, это объясняется локальными перегревами и неоднородным составом золы.

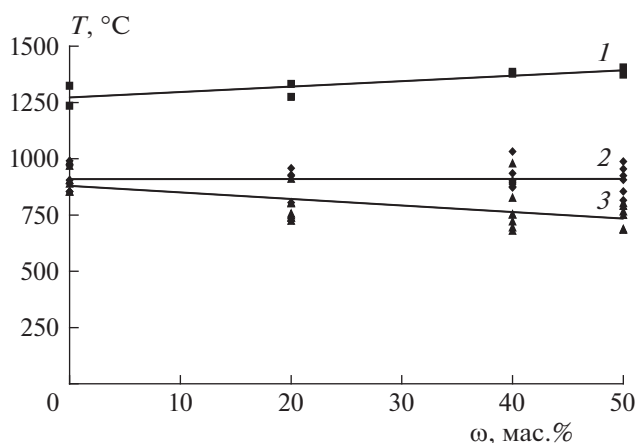


Рис. 2. Зависимости температуры горения (T , °С) угля от содержания твердых добавок (ω , мас.%). 1 – с инертным теплоносителем (по оси реактора), 2 – с инертным теплоносителем (у стенки реактора), 3 – с мрамором (у стенки реактора).

При использовании в качестве добавки частиц мрамора температуру горения измеряли только у стенки реактора. Температура горения снижалась с 910 до 750 °С с увеличением содержания добавки мрамора от 0 до 50 мас.%, что, очевидно, связано с затратами энергии на разложение карбоната кальция до оксида кальция и диоксида углерода. Плавления золы во всех случаях, когда в газифицируемый уголь добавляли мрамор, не происходило. Массовая скорость горения угля во всех экспериментах линейно снижалась при увеличении доли негорючего материала с 0.142 (уголь без добавок) до 0.130 г/с (уголь с добавкой 50% негорючей компоненты).

С увеличением содержания обоих видов негорючей добавки доля горючих компонентов (СО и Н₂) в продукт-газе снижается, а негорючих (СО₂) — увеличивается (рис. 3). Это видно при добавлении к газифицируемому углю мрамора. Если при добавлении фарфоровых колец Рашига теплота сгорания газообразных продуктов снижается с 3.6 до 2.8 МДж/м³, то для составов с мрамором — до 2.2 МДж/м³. Следует отметить, что если при газификации составов с инертным теплоносителем изменение соотношения СО/СО₂ приводит к сокращению объема образующихся газообразных продуктов примерно на 5%, то при газификации составов с мрамором за счет дополнительного объема углекислого газа, образующегося при разложении карбоната кальция, выход газообразных продуктов практически не меняется.

При сжигании бурого угля без минеральных добавок доля серы в золе составляет 12% от начального содержания серы в угле. Это объясняется наличием в золе исходного угля небольшого количества кальция (2.1% в пересчете на СаО) в форме карбоната кальция, который реагирует с сероводородом с образованием сульфида кальция или с диоксидом серы и кислородом с образованием сульфата кальция; последний при температурах эксперимента (910–1270 °С) практически не разлагается. Высокое содержание железа в угле (18.8% в пересчете на Fe₂O₃) не оказывает влияния на поглощение серы из серосодержащего продукт-газа, так как при температурах выше 600 °С сульфаты железа неустойчивы [19].

Добавление к твердым продуктам сгорания, полученным при сжигании смеси тульского угля с мрамором в массовом соотношении 1 : 1, разбавленной соляной кислоты привело к выделению сероводорода. Это показывает, что одним из соединений серы в золе является сульфид кальция.

Добавка инертного теплоносителя приводит к снижению долей углерода и серы, переходящих из угля в твердые продукты сгорания (рис. 4). По-видимому, это происходит из-за того, что небольшое увеличение температуры и некоторое снижение скорости горения (т.е. зольный остаток находился

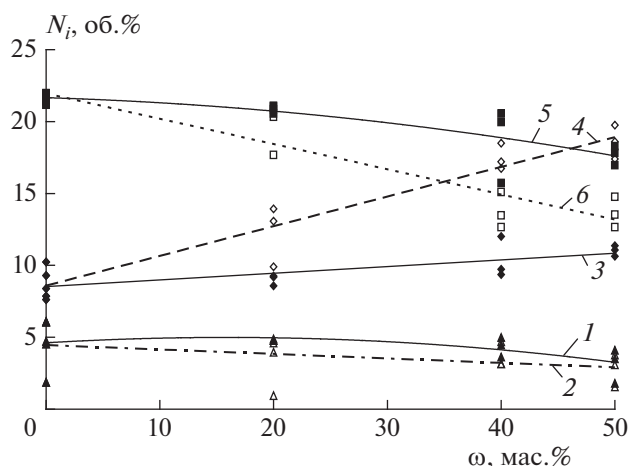


Рис. 3. Зависимости содержания газообразных продуктов (N_i , об.%) от содержания твердых добавок (ω , мас.%) (сплошные линии и заполненные точки — инертный теплоноситель, штриховые линии и незаполненные точки — мрамор, 1 и 2 — Н₂, 3 и 4 — СО₂, 5 и 6 — СО).

несколько дольше при более высокой температуре) способствует более полному выгоранию углерода, окислению сульфида кальция и частичному разложению сульфата кальция [20]. Остаточное количество серы в твердых продуктах сгорания составляет 2%.

Добавка мрамора приводит к увеличению доли серы в твердых продуктах сгорания с 12 до 37%. По-видимому, небольшое снижение температуры, вызванное частичным разложением СаСО₃, оказалось достаточным для предотвращения или снижения степени разложения сульфата кальция и выгорания сульфида кальция. Глубину выгорания углерода для смесей угля с мрамором не анализировали.

Рентгенофазовый анализ полученной золы (рис. 5) показал наличие сульфата, сульфида, карбоната и гидроксида кальция. Сульфида кальция (СаSO₃) обнаружено не было, что согласуется с литературными данными [21].

Пиролиз в нагревательной печи угля без добавок при температурных режимах, близких к условиям начала горения угля в эксперименте (800–900 °С), показал, что в жидкие и газообразные продукты пиролиза переходит примерно 30–40% серы, содержащейся в угле. Сера в газообразных продуктах пиролиза преимущественно находится в виде Н₂S с небольшим количеством серооксида углерода (СОS). В жидкие продукты пиролиза переходит примерно 10% серы, формы которой мы не определяли из-за их многообразия и сложности химического анализа. Таким образом, при пиролизе примерно 20–30% содержащейся в угле серы переходит в Н₂S и СОS. Остающиеся в коксе при-

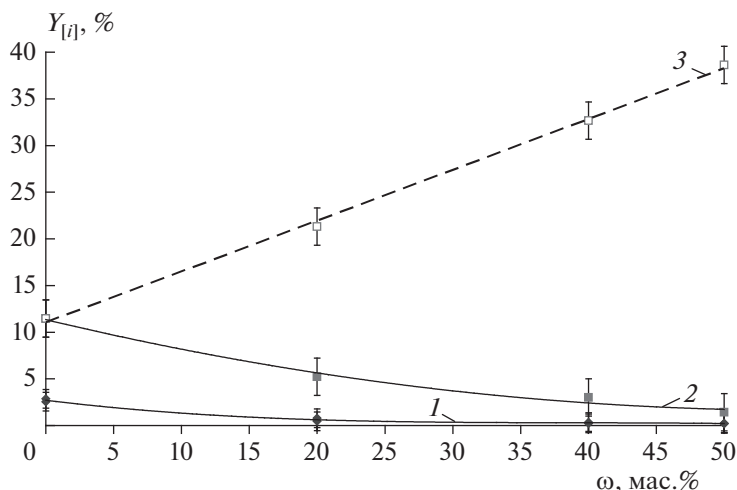


Рис. 4. Зависимости долей углерода и серы (Y_{ij} , %), переходящих в твердые продукты сгорания (в расчете на 1 кг угля), от содержания введенной твердой добавки (ω , мас.%) : 1 – [C] и 2 – [S] для колец Ришага, 3 – [S] для мрамора.

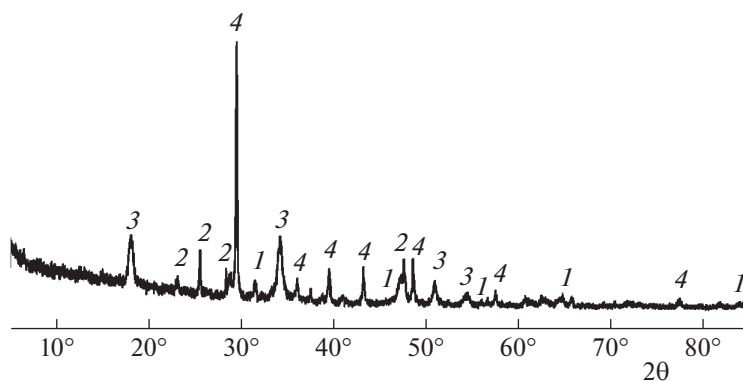


Рис. 5. Рентгенофазовый анализ золы, полученной при сжигании смеси тульского угля с мрамором (массовое соотношение 1 : 1): 1 – CaS, 2 – CaSO₄, 3 – Ca(OH)₂, 4 – CaCO₃.

мерно 60–70% исходной серы после пребывания в зоне горения переходят в золу (примерно 12%) и в газообразные продукты в виде SO₂ (примерно 48–58%).

Выход смолы в обеих сериях экспериментов составлял примерно 8% от массы угля, что согласуется с ранее полученными данными [17]. Состав смолы практически не зависит от вида и количества добавки. Элементный состав смолы: С – 74.5–75.5%, Н – 6.8–8.4%, О – 10.7–13.3%, N – 0.8–1.2%, S – 2.9–4.6%.

ВЫВОДЫ

1. Добавление к газифицируемому углю химически инертного наполнителя приводит к повышению температуры газификации и, следовательно, снижению содержания серы в золе с 12% от ее исходного содержания в угле (без добавок)

до 2% (при 50 мас.% добавки) из-за разложения сульфата кальция и выгорания сульфида кальция.

2. Рентгенофазовый анализ золы, полученной при сжигании смеси тульского угля с мрамором в массовом соотношении 1 : 1, показал наличие сульфата, сульфида, карбоната и гидроксида кальция.

3. Добавка 50 мас.% мрамора ведет к увеличению доли серы, остающейся в зольном остатке с 12 до 37%. Доля серы, переходящая в пиролизную смолу, при этих условиях мало зависит от вида и количества добавки и составляет примерно 10%; доля серы, переходящей в газообразные продукты, соответственно снижается с 78 до 53%.

4. Нейтрализация и удержание серы в твердых продуктах сгорания, равное 37% от исходного содержания серы в угле при добавке 50% мрамора, не является предельным. Увеличивать количество добавляемого мрамора выше 40–50 мас.% нецелесообразно из-за сильного снижения теп-

лоты сгорания газообразных продуктов и КПД газификации. Более перспективным представляется поиск добавки с большей площадью поверхности и/или высокой активностью (например, карбонат натрия или гидроксид кальция).

Определение элементного состава горючих материалов, образующихся продуктов горения, состава шлама и минеральной части золы выполнены сотрудниками АЦКП ИПХФ РАН ст. инженером Г.В. Гусевой и с. н. с., к. ф.-м. н. Н.Н. Дрёмой. Рентгенофазовый анализ и расшифровка рентгенограмм выполнена в лаборатории структурной химии в. н. с., к. х. н. Д.В. Корчагиным.

Исследование выполнено при финансовой поддержке государственным заданием № 0089-2019-0018 (регистрационный номер АААА-А19-119022690098-3).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Abad A., de Las Obras-Loscertales M., García-Labiano F. et al.* // Chem. Eng. J. 2017. V. 310. P. 226; <https://doi.org/10.1016/j.cej.2016.10.113>
2. *Maaten B., Loo L., Konist A. et al.* // J. Anal. Appl. Pyrolysis. 2017. V. 128. P. 405; <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2017.09.007>
3. *Pinto F., André R.N., Franco C. et al.* // Fuel. 2010. V. 89. № 11. P. 3340; <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2010.03.017>
4. *Stanger R., Wall T.* // Prog. Energy Combust. Sci. 2011. V. 37. № 1. P. 69; <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2010.04.001>
5. *Потапенко В.А., Кузнецов Ю.Н., Гавришин С.С.* // Горная промышленность. 2012. № 4. С. 104.
6. Комплексная переработка углей и повышение эффективности их использования. Кат.-справ. / Под общ. ред. Шадова В.М. М.: НТК "Трек", 2007.
7. *Meng X., De Jong W., Pal R. et al.* // Fuel Process. Technol. 2010. V. 91. № 8. P. 964; <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2010.02.005>
8. *Кришеник П.М., Костин С.В., Озерковская Н.И., Шкадинский К.Г.* // Хим. физика. 2019. Т. 38. № 2. С. 45; <https://doi.org/10.1134/S0207401X19020092>
9. *Кислов В.М., Цветкова Ю.Ю., Глазов С.В. и др.* // Хим. физика. 2020. Т. 39. № 8. С. 64; <https://doi.org/10.31857/S0207401X20080038>
10. *Цветков М.В., Зайченко А.Ю., Жирнов А.А.* // Теорет. основы хим. технологии. 2013. Т. 47. № 5. С. 589; <https://doi.org/10.7868/S0040357113040179>
11. *Салганская М.В., Глазов С.В., Салганский Е.А. и др.* // Хим. физика. 2008. Т. 27. № 1. С. 20.
12. *Цветков М.В., Полианчик Е.В., Зайченко А.Ю.* // Теорет. основы хим. технологии. 2018. Т. 52. № 5. С. 573.
13. *Манелис Г.Б., Полианчик Е.В.* // Альтернативная энергетика и экология. 2008. № 2(58). С. 123.
14. *Chen H.K., Li B.Q., Yang J.I. et al.* // Fuel. 1998. V. 77. № 6. С. 487; [https://doi.org/10.1016/S0016-2361\(97\)00275-5](https://doi.org/10.1016/S0016-2361(97)00275-5)
15. *Yang F., Lai Y., Song Y.* // Process Saf. Environ. Prot. 2019. V. 129. P. 163; <https://doi.org/10.1016/j.psep.2019.06.023>
16. *Song Z., Zhang M., Ma C.* // Fuel Process. Technol. 2007. V. 88. № 6. P. 569; <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2007.01.014>
17. *Salgansky E.A., Kislov V.M., Glazov S.V., Salganskaya M.V.* // J. Combust. (Egypt). 2016. Article ID 9637082; <https://doi.org/10.1155/2016/9637082>
18. *Колесникова Ю.Ю., Кислов В.М., Салганский Е.А.* // Хим. физика. 2016. Т. 35. № 9. С. 53; <https://doi.org/10.7868/S0207401X16090041>
19. *Gallagher P.K., Johnson D.W., Schrey F.* // J. Amer. Ceram. Soc. 1970. V. 53. № 12. P. 666; <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1970.tb12038.x>
20. *Jia X., Wang Q., Cen K. et al.* // Fuel. 2016. V. 163. P. 157; <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2015.09.054>
21. *Davies N.H., Laughlin K.M., Hayhurst A.N.* // Proc. 25th Sympos. (Intern.) on Combust. Pittsburgh: The Combust. Inst., 1994. P. 211; [https://doi.org/10.1016/S0082-0784\(06\)80646-6](https://doi.org/10.1016/S0082-0784(06)80646-6)