

О ПОВЕДЕНИИ ЗОЛЫ ОСАДКА СТОЧНЫХ ВОД В УСЛОВИЯХ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЕРЕРАБОТКИ

© М. В. Цветков¹, Д. Н. Подлесный¹, В. М. Фрейман^{1,2}, Ю. Ю. Цветкова¹,
М. В. Салганская^{1,2}, И. В. Зюкин^{1,2}, А. Ю. Зайченко¹, Е. А. Салганский¹

¹ Институт проблем химической физики РАН,
142432, Московская обл., г. Черноголовка, пр. Академика Семенова, д. 1

² Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова,
119991, г. Москва, Ленинские горы, д. 1
E-mail: tsvetkov@icp.ac.ru

Поступила в Редакцию 13 апреля 2020 г.
После доработки 27 апреля 2020 г.
Принята в печать 27 апреля 2020 г.

Экспериментально охарактеризован осадок сточных вод, а также химический состав его золы. Минеральные соединения золы исследованы с помощью рентгеноспектрального микроанализа, рентгенофазового анализа и инфракрасной спектроскопии. Температуры плавления золы осадка сточных вод определены методом конусов. Рассчитаны основные показатели шлакообразования: основно-кислотное соотношение, индекс вязкости шлака, коэффициент обрастания. Изученная зола содержит значительные количества P_2O_5 , CaO , SiO_2 и Fe_2O_3 . Термодинамические расчеты показали, что в интервале температур 600–1400°C наблюдается большое количество $Ca_3(PO_4)_2$ и $CaSiO_3$, значительное количество Fe_2O_3 , небольшое количество $MgSiO_3$, Al_2O_3 , SiO_2 . Зола осадка сточных вод склонна к шлакованию и обрастанию на стенках реактора.

Ключевые слова: осадок сточных вод; температуры плавления золы; шлакуемость; минеральные соединения; термодинамические расчеты

DOI: 10.31857/S0044461820060134

Количество осадка сточных вод с очистных сооружений быстро растет во всем мире и составляет порядка 4.2 млрд т в год. В России ежегодно на очистных сооружениях образуется более 100 млн т осадка сточных вод с влажностью 98%, что составляет 2–3 млн т на сухое вещество. В настоящее время в России переработкой осадка сточных вод занимаются мало, в основном он занимает огромные площади земли (илы полей фильтрации). Методы утилизации осадка сточных вод включают в себя повторное использование в сельском хозяйстве, сжигание или захоронение отходов, но все они имеют ряд недостатков, связанных с загрязнением воздуха или почвы тяжелыми металлами и другими токсичными соединениями, содержащимися в осадке [1]. В долгосрочной перспективе сжигание и другие виды термической переработки осадка сточных вод будут играть ключевую

роль в их утилизации в связи с ужесточением ограничений, касающихся его захоронения и повторного использования в сельском хозяйстве.

Осадок сточных вод представляет собой остаточное вещество от очистки бытовых и промышленных сточных вод и является одним из известных альтернативных источников энергии [2]. В сухом виде осадок сточных вод можно рассматривать как возобновляемое топливо из-за большого количества органических веществ с достаточно высокой теплотворной способностью, которая составляет 12–20 МДж·кг⁻¹, что эквивалентно бурому углю (11.7–15.8 МДж·кг⁻¹) [3].

В составе золы осадка сточных вод преобладают следующие химические элементы: Si, Ca, P, Fe, Al, O, Mg, K, S и Na [4]. Наличие сульфатов и хлоридов щелочных металлов, фосфатов кальция и железа, окси-

дов железа в золе приводит при высокотемпературной переработке к серьезным эксплуатационным проблемам: шлакованию и коррозии оборудования.

В настоящее время существуют несколько способов термической переработки осадка сточных вод: пиролиз, газификация, моносжигание и совместное сжигание [5–8]. Трудности термической переработки осадка сточных вод связаны с высокой исходной влажностью (88–99%), образованием летучих веществ, наличием тяжелых металлов в золе и кислых газов в дымовом газе [9]. Независимо от способа термической переработки осадка сточных вод шлакование зольного остатка будет усложнять разгрузку реактора.

Одним из перспективных методов термической переработки осадка сточных вод является газификация в режиме фильтрационного горения. Газификация твердых топлив в режиме фильтрационного горения в противоточных системах обладает рядом преимуществ: высокой чистотой отходящих газов, высокой эффективностью процесса, возможностью использования низкокалорийных и мелкодисперсных отходов [10–13]. При газификации топлива образуется продукт-газ (смесь CO, H₂, CO₂ и др.), который после очистки можно использовать для получения тепловой или электрической энергии [14–16].

Технология газификации в режиме фильтрационного горения предполагает твердое золоудаление, поэтому плавление золы ограничивает максимальную рабочую температуру.

Этапы плавления золы, согласно ГОСТ 32978–2014 «Топливо твердое минеральное. Определение плавкости золы», можно описать с помощью четырех характерных температур (АFT): температура деформации (DT), температура сферы (ST), температура полусферы (HT), температура растекания (FT).

При достижении рабочей температуры выше температуры деформации золы наблюдается спекание шихты, что препятствует разгрузке зольного остатка, приводит к остановке газификатора и ведет к экономическим потерям для всей цепи производства энергии. Следовательно, для предотвращения аварийных ситуаций важно до начала сжигания осадка сточных вод знать химический состав его золы и температуру ее плавления, а также иметь возможность управлять температурным режимом газификации таким образом, чтобы не превышать температуру деформации золы и (или) применять иные методы предотвращения спекания золы [17].

Целью работы являлось определение температур плавления золы осадка сточных вод, а также изучение поведения минеральных компонентов золы в условиях высокотемпературной газификации.

Экспериментальная часть

Исследуемый осадок сточных вод образуется на очистных сооружениях г. Черноголовка Московской области. Осадок сточных вод предоставлен федеральным государственным унитарным предприятием «Управление эксплуатации научного центра РАН в Черноголовке». Предварительно проведен технический анализ осадка сточных вод 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». В расчете на рабочую массу влажность осадка сточных вод составила 86.1 мас%, выход летучих веществ — 8.4 мас%, нелетучего углерода — 3.0 мас%, зольность — 2.5 мас%. Количественный анализ высушенного осадка сточных вод проводили на CHNS/O элементном анализаторе Vario MICRO cube.

Элементный состав осадка сточных вод на сухую беззольную массу определяли методом сжигания в потоке кислорода (мас%): С — 40.1, Н — 5.7, S — 2.1, N — 6.7, O — 45.4 (по разнице).

Образцы золы осадка сточных вод готовили в соответствии с ГОСТ Р 55661–2013 «Топливо твердое минеральное. Определение зольности». Образцы помещали в муфельную печь, нагревали до 500°C в течение 30 мин, выдерживали 30 мин, затем поднимали температуру до заданной (600–1200°C) со скоростью 20 град·мин⁻¹ и выдерживали в течение 2 ч. Далее золу охлаждали до комнатной температуры и хранили в герметичной таре для последующего анализа. Полученную золу анализировали на сканирующем автоэмиссионном электронном микроскопе Zeiss LEO SUPRA 25 для определения ее микроструктуры и химического состава.

Химический состав золы осадка сточных вод в пересчете на оксиды (мас%): SiO₂ — 27.13, Al₂O₃ — 4.99, Fe₂O₃ — 13.11, CaO — 29.47, MgO — 2.67, Na₂O — 1.75, K₂O — 3.29, P₂O₅ — 14.06, SO₃ — 3.53.

Состав золы аналогичен составу золы осадка сточных вод, получаемого на других очистных сооружениях [2–4].

Для определения кристаллических фаз золу осадка сточных вод анализировали на рентгеновском порошковом дифрактометре ДРОН-УМ2 с рентгеновской трубкой с CuK_α-излучением с размером шага 0.05° в интервале 2θ = 10–80°. Для идентификации фаз использовали электронную базу данных PDF-4 + ICDD.

Для определения пространственных групп атомов золу анализировали на ИК-Фурье-спектрометре

Bruker VERTEX 70. Исследовали спектральную область от 50 до 2500 см⁻¹. В спектрах представлены пики поглощения, которые соответствуют частотам колебаний связей между атомами.

Определение температур плавления золы осадка сточных вод проводили по ГОСТ 32978–2014 «Топливо твердое минеральное. Определение плавкости золы». Использовали высокотемпературную муфельную печь SNOL с возможностью нагрева до 1650°C, в которую помещали цилиндрические образцы золы высотой 6 мм и диаметром 6 мм. Скорость нагрева образцов до температуры 900°C составляла 20 град·мин⁻¹, затем скорость нагрева уменьшали до 5 град·мин⁻¹ до достижения заданного значения температуры. Время выдержки образцов золы при заданной температуре в окислительной атмосфере составляло 1 ч. После охлаждения образцов до комнатной температуры производили их визуальный осмотр на предмет изменения формы.

Измерения элементного состава осадка сточных вод и его золы, микроструктуры золы, рентгенофазовый анализ золы выполнены в Аналитическом центре коллективного пользования ИПХФ РАН.

Для определения зависимости содержания стабильных конденсированных фаз от температуры в золе осадка сточных вод использовали термодинамический пакет программ Tega, основанный на минимизации общей энергии Гиббса исследуемой системы. Он может использоваться для прогнозирования многофазных равновесий, соотношений жидкой и

твердой фаз, а также фазовых переходов при различных температурах для гетерогенных систем [18].

При расчетах химического состава, близкого к экспериментально определенному для золы осадка сточных вод, изучали химические равновесия в температурном интервале 600–1400°C с интервалом 20° в окислительной атмосфере при давлении 0.1 МПа.

Обсуждение результатов

Температура деформации золы осадка сточных вод составила 1190 ± 4°C (DT), температура сферы — 1220 ± 4°C (ST), температура полусферы — 1240 ± 4°C (HT). При температуре 1270 ± 4°C наблюдали полное плавление образца (FT) и растекание его на керамической подложке. При температурах выше 900°C наблюдается постепенное значительное уменьшение образца в объеме (в 3–4 раза) с сохранением исходной формы.

Важным параметром, характеризующим золу осадка сточных вод, является основно-кислотное соотношение, которое определяется делением суммы основных компонентов (CaO, MgO, Na₂O, K₂O, Fe₂O₃) на сумму кислотных компонентов (SiO₂, Al₂O₃, P₂O₅) [19]. Это отношение широко применяется при моделировании шлакования золы и включается в формулу вычисления фактора шлакования (R_S). В нашем случае R_S определяется по эмпирической формуле, в которую подставляются мас% содержания оксидов:

$$R_S = (\text{Fe}_2\text{O}_{31.5} + \text{CaO} + \text{MgO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}) / (\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3).$$

Основно-кислотное отношение для золы осадка сточных вод, рассчитанное по вышеприведенной формуле, равно 1.83, что относит золу осадка сточных вод к средней степени шлакуемости ($R_S = 0.6–2.0$). Другим характерным параметром золы является индекс вязкости шлака (S_R), который зависит от содержания SiO₂ и Fe₂O₃ и рассчитывается по формуле [19]

$$S_R = 100\text{SiO}_2 / (\text{SiO}_2 + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{CaO} + \text{MgO}).$$

Для золы осадка сточных вод $S_R = 37.5$, что соответствует высокому уровню шлакования ($S_R < 65$). Эвтектики с низкой температурой плавления (SiO₂ + Fe₂O₃) и (SiO₂ + K₂O) могут оказывать сильное влияние на агломерацию частиц золы. В процессе спекания железо реагирует с кварцем и алюмосиликатами с образованием силикатов железа и силикатов железа и алюминия, которые могут плавиться при более низких температурах. Коэффициент обрастания

(F_U) определяется по формуле $F_U = R_S(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$ [19]. Для золы осадка сточных вод это значение равно 9.2, что относит ее к высокой степени обрастания ($F_U = 0.6–40$). Отношение Fe₂O₃/CaO = 0.45 подтверждает возможность образования Fe–Ca-эвтектики и увеличение образования шлака.

При нагревании золы осадка сточных вод до температуры 600°C наблюдали образование множества диспергированных частиц (рис. 1). При 700°C частицы золы агрегировались за счет спекания, образуя крупные нерегулярные ансамбли, однако зола сохраняла рыхлую и пористую структуру. При 800°C зола продолжала спекаться дальше, частицы плотно соединялись, образуя однородные плотные агрегаты путем частичного сплавления. При 900–1000°C образовывались непрерывные фазы и плотная структура с большим количеством захваченных мелких частиц, что подтверждалось значительным уменьшением объема образца. Отметим, что зола осадка сточных

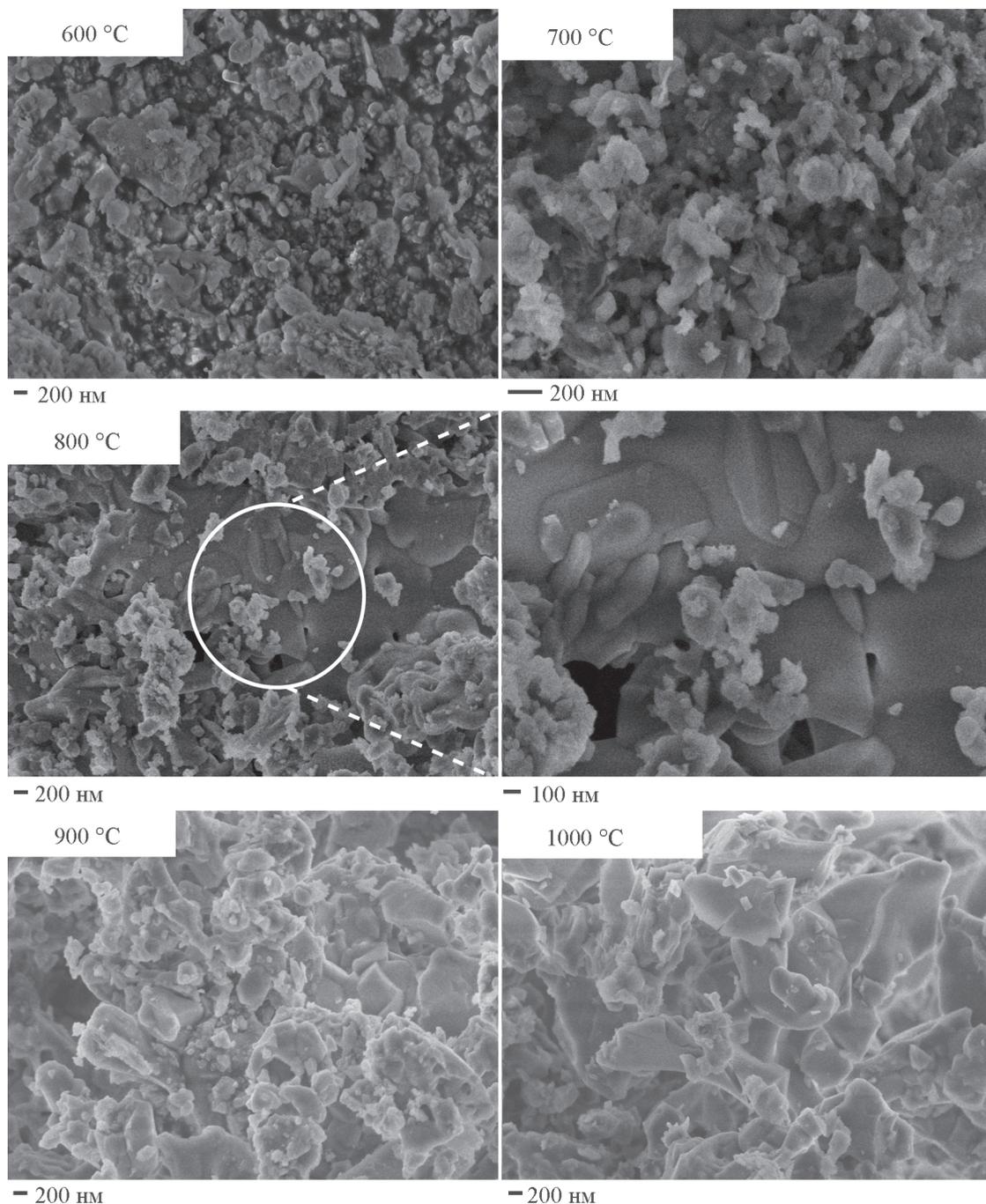


Рис. 1. Фотографии зола осадка сточных вод, полученные методом сканирующей электронной микроскопии.

вод неоднородна, поэтому при повышении температуры изначально плавятся отдельные зерна.

Термодинамические расчеты химических равновесий, выполненные для химического состава зола осадка сточных вод, показали, что во всем интервале температур образуется большое количество фосфата кальция и силиката кальция, значительное количество оксида железа, небольшое количество силиката магния, оксида алюминия, диоксида кремния (рис. 2).

При повышении температуры выше 660 °C диоксид кремния переходит частично в тетрасиликат калия (кривые 4 и 5), а при температуре более 1280 °C — практически полностью.

Присутствие калия снижает температуру плавления зола из-за образования силикатов калия [20]. Присутствие фосфора и железа в золе также увеличивает шлакуемость зола из-за образования эвтектик оксида железа с SiO_2 и Al_2O_3 с низкой температурой

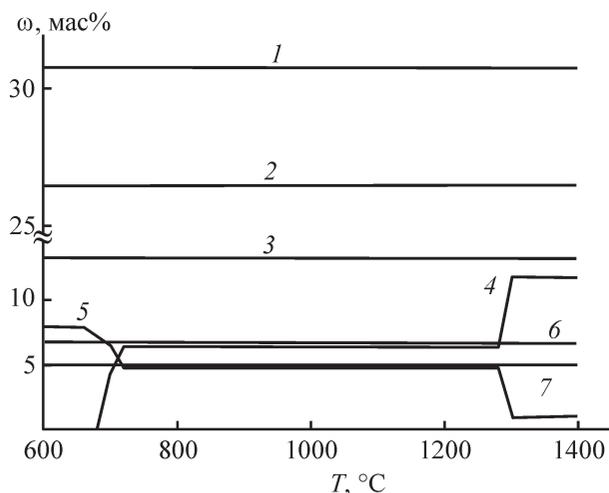


Рис. 2. Расчетные зависимости содержания стабильных конденсированных фаз в золе осадка сточных вод от температуры.

1 — $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$, 2 — CaSiO_3 , 3 — Fe_2O_3 , 4 — $\text{K}_2\text{Si}_4\text{O}_9$,
5 — SiO_2 , 6 — MgSiO_3 , 7 — Al_2O_3 .

плавления ($\sim 900^\circ\text{C}$) и образования фосфатов кальция, магния и алюминия.

Существование фазы фосфата кальция и магния, силиката кальция, а также оксида железа подтверждается данными рентгенофазового анализа и ИК-спектроскопией Фурье, представленными ниже.

В реальных системах концентрации образующихся веществ могут отличаться от концентраций, рассчитанных в условиях термодинамического равновесия, из-за неоднородности состава отдельных частиц золы и относительно медленно протекающих химических реакций.

Рентгенограммы показывают, что при 800°C основными кристаллическими фазами являются CaCO_3 (кальцит), $(\text{Ca},\text{Mg})_3(\text{PO}_4)_2$ (витлокит), Al_2SiO_5 (кианит), оксиды железа (Fe_2O_3 и Fe_3O_4) (рис. 3). При повышении температуры до 1000°C фаза кальцита не обнаруживается из-за его разложения до оксида кальция и диоксида углерода. При 1200°C обнаруживается фаза силлиманита Al_2SiO_5 , в который переходит кианит, и фаза волластонита (CaSiO_3), который образуется при реакции оксида кальция с диоксидом кремния. На рентгенограммах не обнаруживаются кристаллические фазы силикатов калия и натрия, по-видимому, из-за их плавления при температурах $\sim 770\text{--}980^\circ\text{C}$ и перехода в аморфную фазу.

Результаты ИК-спектроскопии золы осадка сточных вод после прокаливания до заданных температур ($600, 700, 800, 900, 1000^\circ\text{C}$) качественно схожи во всех исследованных случаях, однако спектры различаются относительной интенсивностью полос поглощения

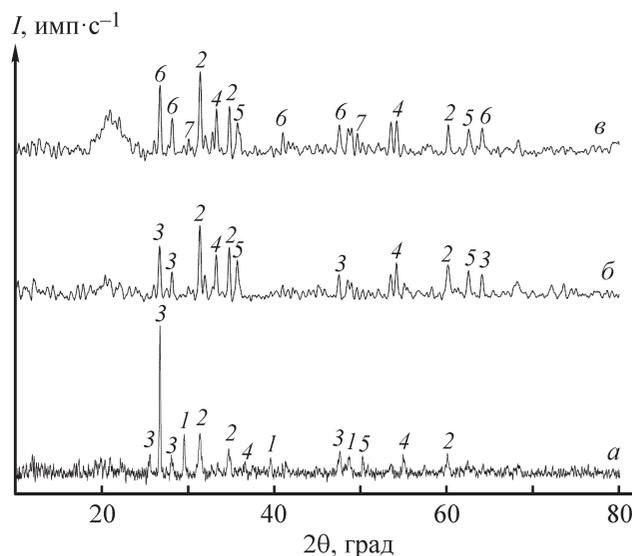


Рис. 3. Рентгенограмма фаз золы осадка сточных вод при 800°C (а), 1000°C (б), 1200°C (в).

1 — CaCO_3 (кальцит), 2 — $(\text{Ca},\text{Mg})_3(\text{PO}_4)_2$, 3 — Al_2SiO_5 (кианит), 4 — Fe_2O_3 (гематит), 5 — Fe_3O_4 , 6 — Al_2SiO_5 (силлиманит), 7 — CaSiO_3 (волластонит).

(рис. 4). Наиболее интенсивные изменения полос поглощения наблюдаются в диапазоне $200\text{--}1200\text{ см}^{-1}$.

На ИК-спектрах образцов золы наблюдаются полосы поглощения с максимумами при $670, 790, 970, 1040\text{ см}^{-1}$, относящиеся к SiO_4 -тетраэдрам, что подтверждает присутствие силикатов в составе твердой фазы. Пик при $\sim 670\text{ см}^{-1}$ обусловлен деформационными колебаниями силоксановых мостиков (Si-O-Si). Валентные колебания данных группировок проявляются при 790 см^{-1} . Полоса поглощения при 970 см^{-1} появляется из-за асимметричных валентных колебаний Si-O-Si или Si-O-Al . Полоса поглощения при 1040 см^{-1} относится к валентным колебаниям связей Si-O . Названные полосы по мере увеличения доли силикатов в золе осадка сточных вод становятся более выраженными и четкими. Полосы поглощения при $400\text{--}550\text{ см}^{-1}$ относятся к деформационным колебаниям кремний-кислородных или алюминий-кислородных группировок [21].

Совместно с полосами поглощения SiO_4 -тетраэдров на ИК-спектрах золы наблюдаются полосы поглощения с максимумами при $1040, 940, 630$ и 550 см^{-1} , соответствующие фосфат-анионам. Максимум при 1040 см^{-1} вызван асимметричными валентными колебаниями связей P-O . Полоса поглощения при 940 см^{-1} относится к симметричным валентным колебаниям. Полосы с максимумом поглощения при 550 см^{-1} обусловлены трижды вырожденными валентными колебаниями O-P-O .

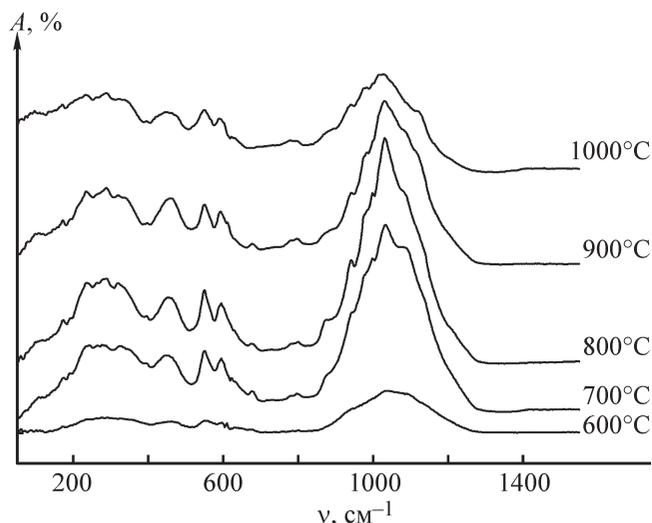


Рис. 4. ИК-спектры Фурье золы осадка сточных вод при различных температурах.

Полосы поглощения при 230, 320, 460 и 590 см^{-1} предположительно характеризуют валентные и деформационные колебания связи Fe–O [22].

Сравнение спектров показывает, что при температурах выше 900°C происходит уменьшение и сглаживание пиков, что свидетельствует о появлении аморфной фазы после частичного плавления золы, последнее согласуется с образованием непрерывной фазы (рис. 1).

Выводы

В составе золы осадка сточных вод преобладают следующие химические элементы: Si, Ca, P, Fe, O, Al, Mg, K, S и Na. Щелочные металлы, связанные с серой и хлором, а также высокое содержание фосфора и железа приводят к серьезным эксплуатационным проблемам: шлакованию и коррозии оборудования.

Термодинамические расчеты показали, что в золе осадка сточных вод содержатся: фосфат кальция, оксиды железа, алюминия и кремния, силикаты кальция, калия, магния. Результаты рентгенофазового анализа и ИК-спектроскопии золы осадка сточных вод в основном согласуются с термодинамическими расчетами химических равновесий.

Для золы осадка сточных вод определены характерные температуры плавления (°C): температура деформации — 1190, температура сферы — 1220, температура полусферы — 1240, температура растекания — 1270. Необходимо отметить, что при температурах выше 900°C наблюдается уменьшение объема образца в 3–4 раза с сохранением исходной формы, связанное с плавлением легкоплавких компонентов.

Основные показатели шлакования (основно-кислотное соотношение, индекс вязкости шлака, коэффициент обрастания) показали, что зола осадка сточных вод склонна к шлакованию и обрастанию на стенках реактора. Экспериментальные данные о температурах плавления золы осадка сточных вод, полученные в статье, будут полезны при контроле максимально возможных рабочих температур при эксплуатации энергетических установок по сжиганию осадка сточных вод.

Для снижения или предотвращения шлакования золы необходимо поддерживать максимальную рабочую температуру ниже температуры деформации, например, путем добавления эндотермических реагентов [H_2O и (или) CO_2] в газ-окислитель. Кроме того, повысить температуру плавления золы можно совместным сжиганием осадка сточных вод с другими топливами (твердые коммунальные отходы, уголь), имеющими более тугоплавкую золу.

Финансирование работы

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований в рамках научного проекта № 19-08-00244 и государственного задания № 0089-2019-0018, номер государственной регистрации АААА-А19-119-022690098-3.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

Информация об авторах

Цветков Максим Вадимович, к.х.н., ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0797-0419>

Подлесный Дмитрий Николаевич, к.ф.-м.н., ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3527-324X>

Фрейман Владимир Михайлович, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6014-356X>

Цветкова Юлия Юрьевна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1014-6698>

Салганская Марина Вячеславовна, к.ф.-м.н., ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2713-4813>

Зюкин Игорь Владиславович, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6682-5449>

Зайченко Андрей Юрьевич, к.т.н., ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1237-1995>

Салганский Евгений Александрович, д.ф.-м.н., ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0243-9992>

Список литературы

- [1] Werther J., Ogada T. Sewage sludge combustion // Prog. Energy Combust. Sci. 1999. V. 25. N 1. P. 55–116. [https://doi.org/10.1016/S0360-1285\(98\)00020-3](https://doi.org/10.1016/S0360-1285(98)00020-3)
- [2] Syed-Hassan S. S. A., Wang Y., Hu S., Su S., Xiang J. Thermochemical processing of sewage sludge to energy and fuel: Fundamentals, challenges and considerations // Renew. Sustain. Energ. Rev. 2017. V. 80. P. 888–913. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.262>
- [3] Samolada M. C., Zabaniotou A. A. Comparative assessment of municipal sewage sludge incineration, gasification and pyrolysis for a sustainable sludge-to-energy management in Greece // Waste Manag. 2014. V. 34. N 2. P. 411–420. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2013.11.003>
- [4] Piasta W., Lukawska M. The effect of sewage sludge ash on properties of cement composites // Procedia Eng. 2016. V. 161. P. 1018–1024. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.08.842>
- [5] Atienza-Martínez M., Fonts I., Abrego J., Ceamanos J., Gea G. Sewage sludge torrefaction in a fluidized bed reactor // Chem. Eng. J. 2013. V. 222. P. 534–545. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2013.02.075>
- [6] Fytali D., Zabaniotou A. Utilization of sewage sludge in EU application of old and new methods — a review // Renew. Sust. Energ. Rev. 2008. V. 12. N 1. P. 116–140. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2006.05.014>
- [7] Wzorek M. Characterisation of the properties of alternative fuels containing sewage sludge // Fuel Process. Technol. 2012. V. 104. P. 80–89. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2012.04.023>
- [8] Jayaraman K., Gökalp I. Pyrolysis, combustion and gasification characteristics of miscanthus and sewage sludge // Energ. Convers. Manage. 2015. V. 89. P. 83–91. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.09.058>
- [9] Suárez-Ruiz I., Díez M. A., Rubiera F. New Trends in Coal Conversion: Combustion, Gasification, Emissions, and Coking. Elsevier Ltd, 2019. P. 1–30. <https://doi.org/10.1016/C2016-0-04039-1>
- [10] Toledo M., Ripoll N., Céspedes J., Zbogar-Rasic A., Fedorova N., Jovicic V., Delgado A. Syngas production from waste tires using a hybrid filtration reactor under different gasifier agents // Energy Convers. Manag. 2018. V. 172. P. 381–390. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.07.046>
- [11] Зайченко А. Ю., Журнов А. А., Манелис Г. Б., Полианчик Е. В., Жолудев А. Ф. Фильтрационное горение углерода при неоднородном течении твердой фазы // Теорет. основы хим. технологии. 2010. Т. 44. № 1. С. 31–36 [Zaichenko A. Yu., Zhirnov A. A., Manelis G. B., Polianchik E. V., Zholudev A. F. Filtration combustion of carbon in a non-one-dimensional solid flow // Theor. Found. Chem. Eng. 2010. V. 44. N 1. P. 30–35. <https://doi.org/10.1134/S0040579510010045>].
- [12] Мирошниченко Т. П., Луценко Н. А., Левин В. А. Исследование режимов фильтрации газа из подземного резервуара при большом начальном перепаде давления // Прикл. механика и техн. физика. 2015. Т. 56. № 5. С. 149–155. <https://doi.org/10.15372/PMTF20150513> [Miroshnichenko T. P., Lutsenko N. A., Levin V. A. Gas filtration from an underground reservoir at a large initial pressure gradient // J. Appl. Mech. Tech. Phys. 2015. V. 56. N 5. P. 864–869. <https://doi.org/10.1134/S0021894415050132>].
- [13] Dmitrienko M. A., Nyashina G. S., Strizhak P. A. Major gas emissions from combustion of slurry fuels based on coal, coal waste, and coal derivatives // J. Clean. Prod. 2018. V. 177. P. 284–301. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.254>
- [14] Кислов В. М., Глазов С. В., Салганский Е. А., Колесникова Ю. Ю., Салганская М. В. Газификация угля смесью воздуха и углекислого газа в режиме фильтрационного горения // Физика горения и взрыва. 2016. Т. 52. № 3. С. 72–78. <https://doi.org/10.15372/FGV20160310> [Kislov V. M., Glazov S. V., Salgansky E. A., Kolesnikova Yu. Yu., Salganskaya M. V. Coal gasification by a mixture of air and carbon dioxide in the filtration combustion mode // Combust. Explos. Shock Waves. 2016. V. 52. N 3. P. 320–325. <https://doi.org/10.1134/S0010508216030102>].
- [15] Toledo M., Rosales C., Silvestre C., Caro S. Numerical simulation of the hybrid filtration combustion of biomass // Int. J. Hydrogen Energy. 2016. V. 41. N 46. P. 21131–21139. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.09.120>
- [16] Зайченко А. Ю., Подлесный Д. Н., Цветков М. В., Салганская М. В., Чуб А. В. Фильтрационное горение углеводородных жидкостей в условиях подвижного слоя инертного теплоносителя // ЖПХ. 2019. Т. 92. № 2. С. 245–250. <https://doi.org/10.1134/S0044461819020166> [Zaichenko A. Y., Podlesnyy D. N., Tsvetkov M. V., Salganskaya M. V., Chub A. V. // Russ. J. Appl. Chem. 2019. V. 92. N 2. P. 276–281. <https://doi.org/10.1134/S1070427219020162>].
- [17] Цветков М. В., Зюкин И. В., Фрейман В. М., Салганская М. В., Цветкова Ю. Ю. Возможные пути предотвращения шлакования золы при газификации торфа в режиме фильтрационного горения // ЖПХ. 2017. Т. 90. № 10. С. 1392–1398 [Tsvetkov M. V., Zyukin I. V., Freiman V. M., Salganskaya M. V., Tsvetkova Y. Y. Possible ways to prevent ash slagging in peat gasification in the filtration combustion mode // Russ. J. Appl. Chem. 2017. V. 90. N 10. P. 1706–1711. <https://doi.org/10.1134/S1070427217100226>].

- [18] Трусов Б. Г. Программная система ТЕРРА для моделирования фазовых и химических равновесий при высоких температурах // III Междунар. симп. «Горение и плазмохимия». Алматы: Казах. национал. ун-т, 2005. С. 24–26.
- [19] Magdziarz A., Wilk M., Gajek M., Nowak-Woźny D., Kopia A., Kalemba-Rec I., Koziński J. A. Properties of ash generated during sewage sludge combustion: A multifaceted analysis // *Energy*. 2016. V. 113. P. 85–94. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.07.029>
- [20] Niu Y., Tan H., Hui S. Ash-related issues during biomass combustion: Alkali-induced slagging, silicate melt-induced slagging (ash fusion), agglomeration, corrosion, ash utilization, and related countermeasures // *Prog. Energy Combust.* 2016. V. 52. P. 1–61. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2015.09.003>
- [21] Saikia B. J., Parthasarathy G. Fourier transform infrared spectroscopic characterization of kaolinite from Assam and Meghalaya, Northeastern India // *J. Modern Physics*. 2010. V. 1. N 4. P. 206–210. <https://doi.org/10.4236/jmp.2010.14031>
- [22] Бургина Е. Б., Кустова Г. Н., Цыбуля С. В., Крюкова Г. Н., Литвак Г. С., Исупова Л. А., Садыков В. А. Особенности строения метастабильной модификации оксида железа(III) // *ЖНХ*. 2000. Т. 41. № 3. С. 489–497 [Burgina E. B., Kustova G. N., Tsybulya S. V., Kryukova G. N., Litvak G. S., Isupova L. A., Sadykov V. A. Structure of the metastable modification of iron (III) oxide // *J. Struct. Chem.* 2000. V. 41. N 3. P 396–402. <https://doi.org/10.1007/BF02741997>].
-