

ПЛАВКОСТЬ ЗОЛЫ ОТХОДОВ РАСТЕНИЕВОДСТВА В УСЛОВИЯХ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЕРЕРАБОТКИ

© М. В. Цветков, Д. Н. Подлесный, А. Ю. Зайченко, М. В. Салганская,
Ю. Ю. Цветкова, В. М. Фрейман, Е. А. Салганский

Институт проблем химической физики РАН,
142432, Московская обл., г. Черноголовка, пр. Академика Семенова, д. 1
E-mail: tsvetkov@icp.ac.ru

Поступила в Редакцию 21 декабря 2020 г.

После доработки 29 декабря 2020 г.

Принята в публикации 22 января 2021 г.

Экспериментально охарактеризованы отходы растениеводства: пшеничной соломы, рисовой шелухи, лузги семян подсолнечника. Определен химический состав золы рассматриваемых отходов при различных температурах методами рентгеноспектрального микроанализа, рентгенофазового анализа и инфракрасной спектроскопии. Химический состав минеральных соединений золы отходов растениеводства варьируется, но преобладают следующие компоненты: CaO, SiO₂, K₂O. Термодинамические расчеты показали, что в золе рисовой шелухи преобладает SiO₂, в золе пшеничной соломы — K₂Si₂O₅ и Ca₃Si₂O₇, в золе лузги семян подсолнечника — соединения калия (K₂O, K₂SiO₃, KCl, K₂SO₄). Методом характерных температур определены температуры плавления золы. Не выявлено какой-либо четкой зависимости между температурами плавления золы и содержанием щелочных металлов в золе. Рассчитаны основные показатели шлакообразования: основно-кислотное соотношение, индекс вязкости шлака, коэффициент обрастания. Зола пшеничной соломы и лузги семян подсолнечника склонна к шлакованию и обрастанию на стенках реактора в отличие от золы рисовой шелухи.

Ключевые слова: биомасса; отходы растениеводства; температуры плавления золы; шлакуемость; щелочные металлы; термодинамические расчеты

DOI: 10.31857/S0044461821030129

Одной из проблем сельского хозяйства является эффективная утилизация и переработка образующихся отходов, объем которых будет возрастать с развитием отрасли. В России ежегодно образуется не менее 160 млн т отходов растениеводства (солома злаковых культур, лузга семян подсолнечника, зерноотходы, шелуха риса, гречихи, проса, отходы сахарного тростника, костра льна и др.), из которых порядка 80 млн т могут быть использованы в качестве топлива [1]. В долгосрочной перспективе спрос на энергию, получаемую при сжигании отходов растениеводства, будет увеличиваться благодаря климатически нейтральному выбросу CO₂: количество выбросов CO₂ при сжигании отходов растениеводства равноценно количеству поглощения CO₂ при росте сельхозкультур.

Технологии термической конверсии биомассы (сжигание, пиролиз, газификация) являются наибо-

лее распространенными технологиями использования биомассы в промышленности [2–4]. Во время термических процессов конверсии биомассы зола часто шлакуется, что приводит к увеличению эксплуатационных затрат на обслуживание теплогенерирующей установки [5, 6].

Количество золы, образующейся во время сжигания, зависит от происхождения топлива и составляет от 1 (для древесной биомассы) до более чем 10% (для сельскохозяйственной биомассы). Несмотря на низкую зольность биомассы, ее зола активно разрушает внутреннюю поверхность тепловой установки из-за высокого содержания щелочных металлов.

В золе биомассы обычно присутствуют хлориды, сульфаты, фосфаты, силикаты и алюмосиликаты натрия, калия, кальция и магния, а также оксиды кремния и железа. Соединения щелочных металлов

являются наиболее важными составляющими золы биомассы, влияющими на процессы шлакования [7]. Во время сжигания топлива соединения щелочных металлов (KOH, KCl, K₂SO₄, NaCl, Na₂SO₄) испаряются и могут образовывать аэрозоли в газовой фазе. Когда температура выходящих газов снижается, аэрозоли могут конденсироваться на частицах летучей золы и стенках реактора с образованием шлаковых отложений. Кроме того, аэрозоли щелочных металлов могут взаимодействовать с другими компонентами золы, например, SiO₂ и Fe₂O₃ с образованием эвтектических смесей [8]. Щелочные металлы могут существовать в твердой фазе в форме силикатов (например, K₂Si₂O₅, Na₂SiO₃) и алюмосиликатов (например, KAlSi₃O₈, KAlSiO₄, NaSi₃AlO₈) [9].

Одним из перспективных методов термической переработки сельскохозяйственных отходов растениеводства является газификация в режиме фильтрационного горения [10]. 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 [11]. При газификации топлива образуется продукт-газ (смесь CO, H₂, CO₂ и др.), который после очистки можно использовать для получения тепловой или электрической энергии [12, 13]. Технология газификации в режиме фильтрационного горения предполагает твердое золоудаление, поэтому плавление золы ограничивает работу реактора при высоких температурах.

Для исключения проблем со шлакованием золы температура горения в реакторе не должна превышать температуры деформации золы. Для этого необходимо до начала сжигания отходов растениеводства определить химический состав золы и температуру ее деформации или применять иные методы предотвращения спекания золы [14].

Цель работы — изучение плавкости золы отходов растениеводства и поведения минеральных компонентов золы в условиях высокотемпературной газификации.

Экспериментальная часть

Объектами изучения служили 3 вида сельскохозяйственных отходов растениеводства: пшеничная солома, рисовая шелуха, лузга семян подсолнечника. Предварительно проведен их технический анализ по ГОСТ 32975.2–2014 «Биотопливо твердое. Определение содержания влаги высушиванием. Часть 2. Общая влага. Ускоренный метод», ГОСТ 32988–2014 «Биотопливо твердое. Определение зольности», ГОСТ 32990–2014 «Биотопливо твердое. Определение выхода летучих веществ». Элементный состав топлив определяли на CHNS/O элементном анализаторе Vario Microcube (Elementar GmbH) методом сжигания в потоке кислорода (табл. 1).

Золу после охлаждения до комнатной температуры хранили в герметичной таре для последующих анализов. Микроструктуру и химический состав золы определяли с помощью сканирующего автоэмиссионного электронного микроскопа Zeiss LEO SUPRA 25. Для определения кристаллических фаз золу отходов растениеводства анализировали на рентгеновском порошковом дифрактометре ДРОН-УМ2 с рентгеновской трубкой с CuK_α-излучением с размером шага 0.04° в диапазоне 2θ = 10–80°. Для идентификации фаз использовали электронную базу данных PDF-4 + ICDD.

Золу анализировали на ИК-Фурье-спектрометре Bruker VERTEX 70 в спектральной области от 50 до 5000 см⁻¹. Для определения температур плавления золы отходов растениеводства использовали высокотемпературную муфельную печь SNOL с возможностью нагрева до 1650°C, в которую помещали образцы золы высотой 10 мм и диаметром 6 мм. Скорость нагрева образцов до температуры 550°C составляла 20 град·мин⁻¹, затем скорость нагрева уменьшали до 2 град·мин⁻¹ до достижения изменения формы образца.

Для определения зависимости содержания стабильных конденсированных фаз от температуры в золе отходов растениеводства использовали программу термодинамических расчетов Тетга, основанную

Таблица 1
Характеристика сельскохозяйственных отходов растениеводства

Вид сельскохозяйственных отходов	Элементный состав, мас%					Технический анализ, мас%			
	С	Н	N	S	О	влажность	выход летучих	выход кокса	зола
Пшеничная солома	43.22	6.35	0.08	0.06	34.39	10.7	61.3	22.8	5.2
Рисовая шелуха	35.78	5.34	0.21	0.11	35.06	8.8	47.6	28.9	14.7
Лузга семян подсолнечника	50.13	6.91	0.75	0.08	29.03	10.3	57.8	29.1	2.8

на минимизации общей энергии Гиббса исследуемой системы [15]. Исследовали температурный интервал 600–1400°C с шагом 20°C в окислительной атмосфере при давлении 0.1 МПа.

Основно-кислотное соотношение ($R_{B/A}$) часто используется как мера склонности золы к шлакованию и вычисляется по эмпирической формуле (1), определяющей соотношения между содержаниями оксидов (в мас%). Индекс вязкости шлака (S_R) рассчитывается по формуле (2), коэффициент обрастания (F_U) определяется по формуле (3) [16]:

$$R_{B/A} = ([Fe_2O_3] + [CaO] + [MgO] + [Na_2O] + [K_2O]) / ([SiO_2] + [Al_2O_3]), \quad (1)$$

$$S_R = 100[SiO_2] / ([SiO_2] + [Fe_2O_3] + [CaO] + [MgO]), \quad (2)$$

$$F_U = R_{B/A}([Na_2O] + [K_2O]). \quad (3)$$

Обсуждение результатов

Химический состав минеральных соединений золы отходов растениеводства варьируется, преобладающими компонентами являются CaO, SiO₂, K₂O (табл. 2).

Температура деформации золы имеет параболическую зависимость по отношению к $R_{B/A}$, достигая минимума при промежуточных значениях $R_{B/A}$. Для золы углей минимум находится примерно при $R_{B/A} = 0.75$, а для биомассы минимум проявляется при более низких значениях ($R_{B/A} = 0.6$), при этом минимальные значения температуры деформации

золы составляют 900°C [17]. Основно-кислотное соотношение показывает, что зола лузги подсолнечника будет сильно склонна к шлакованию ($R_{B/A} > 2$), зола пшеничной соломы будет характеризоваться средней степенью шлакуемости ($0.6 < R_{B/A} < 2$), а зола рисовой шелухи шлаковаться не будет ($R_{B/A} < 0.6$) (табл. 3).

Зола пшеничной соломы и рисовой шелухи характеризуется высокой вязкостью шлака ($S_R > 72$) и, следовательно, низкой склонностью к шлакованию в отличие от золы лузги подсолнечника, которая будет шлаковаться значительно ($S_R < 65$). Зола рисовой шелухи относится к золе с низкой степенью обрастания ($F_U < 0.6$), а зола пшеничной соломы и лузги подсолнечника к золе с чрезвычайно высокой степенью обрастания ($F_U > 40$).

При повышении температуры с 550 до 815°C наблюдали постепенное выгорание остаточного углерода, что заметно по осветлению всех исследуемых образцов золы, а также испарение соединений калия, что визуально наблюдали по белому налету на тигле (для золы пшеничной соломы и лузги семян подсолнечника), это согласуется с химическим составом золы при этих температурах. Содержание калия в золе всех образцов практически линейно падает с повышением температуры, что согласуется с литературными данными [18, 19].

При повышении температуры с 550 до 700°C, несмотря на сохранение цилиндрической формы, наблюдали усадку образца золы пшеничной соломы, что говорит о начальных стадиях плавления образца. Цвет золы при этом изменялся с серого на корич-

Таблица 2
Химический состав золы отходов растениеводства

Компонент	Содержание отдельных компонентов, мас%		
	зола пшеничной соломы	зола рисовой шелухи	зола лузги подсолнечника
SiO ₂	40.16	89.39	6.80
K ₂ O	34.95	5.04	55.24
CaO	8.82	1.30	14.46
MgO	2.60	0.57	6.46
Al ₂ O ₃	0.79	0.22	0.65
Fe ₂ O ₃	0.60	0.40	0.58
Na ₂ O	2.14	0.35	1.23
P ₂ O ₅	1.12	0.87	3.22
SO ₃	3.13	1.35	6.09
Cl ⁻	4.35	0.1	4.03
Прочие вещества	1.34	0.42	1.24

Таблица 3
Основные параметры шлакования золы

Параметр шлакования	Зола пшеничной соломы	Зола рисовой шелухи	Зола лузги подсолнечника
Основно-кислотное соотношение	1.20	0.09	10.46
Индекс вязкости шлака	77	98	24
Коэффициент обрастания	44	0.46	591

невый. С повышением температуры происходило укрупнение частиц золы (рис. 1). При температуре деформации (DT) золы, равной 810°C, происходило изменение формы образца — сглаживание верхней кромки, при температуре 970°C образовывалась сфера (температура сферы, ST), а при 1010°C — полусфера (температура полусферы, НТ). При температуре 1050°C наблюдали полное плавление образца (температура растекания, FT) и растекание его на керамической подложке.

При нагревании золы лузги семян подсолнечника до температуры 550°C наблюдали образование множества отдельных частиц (рис. 2), которые при повышении температуры до 700°C начинали агрегироваться за счет плавления легкоплавких компонентов. При

дальнейшем нагреве образца не происходило изменения его формы вплоть до температуры деформации золы (1230°C). Несмотря на сохранение исходной формы образца, внутри него образовались крупные пустоты, что свидетельствует о значительном уносе легколетучих компонентов (соединений щелочных металлов), поэтому метод характерных температур, основанный на изменении формы образца, не подходит для определения остальных характерных температур плавления золы лузги подсолнечника. Усадка образцов золы пшеничной соломы и лузги семян подсолнечника при 800°C составила около 20–30%, а при 1000°C — 40–50%.

При нагревании образца золы рисовой шелухи с 550 до 1000°C изменения объема практически не

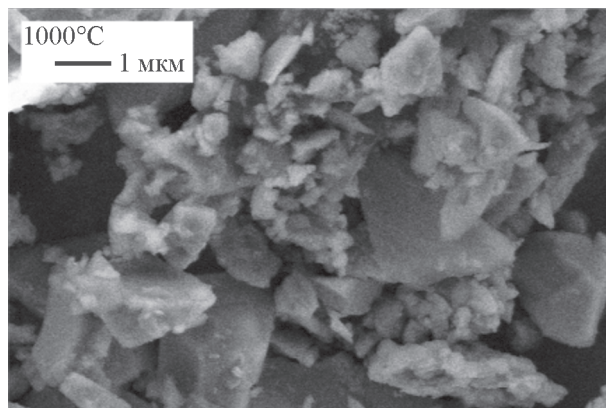
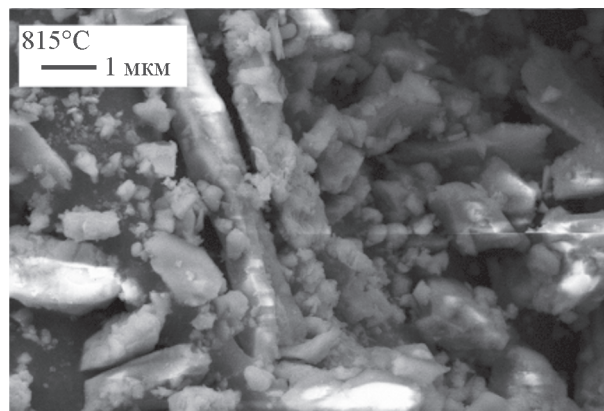
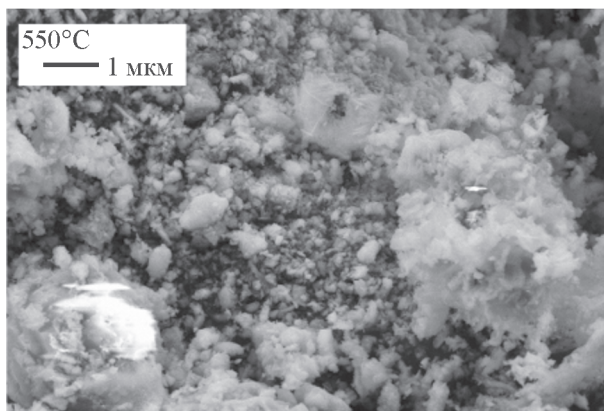


Рис. 1. Фотографии образцов золы пшеничной соломы, полученные методом сканирующей электронной микроскопии.

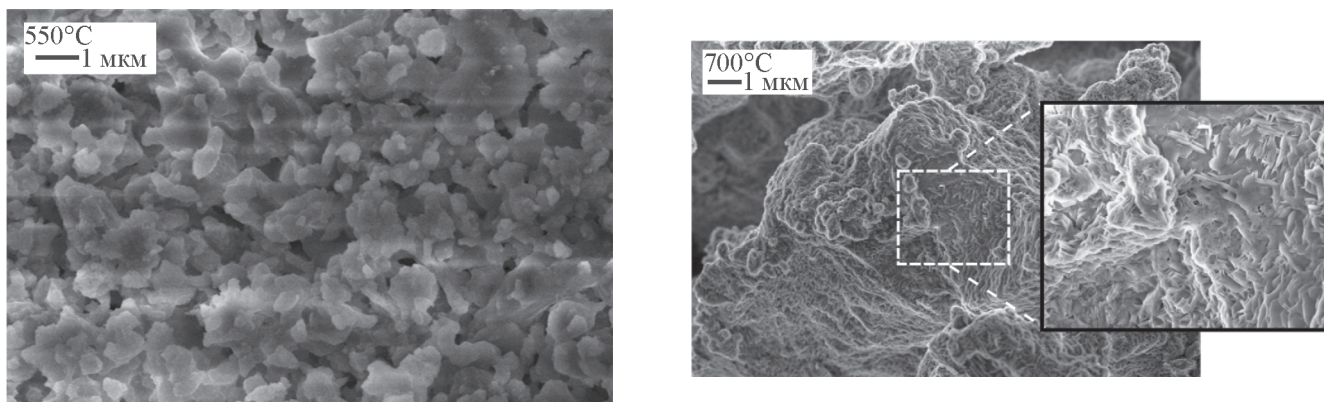


Рис. 2. Фотографии образцов золы лужги семян подсолнечника, полученные методом сканирующей электронной микроскопии.

наблюдалось, цвет изменялся с серого на белый. Характерные температуры плавления составили выше 1400°C, однако уже при 1000°C на фотографии идентифицируются сплавленные частицы золы (рис. 3).

Термодинамические расчеты равновесного состава золы рисовой шелухи показали, что при температурах 600–1400°C основным соединением является SiO_2 (75–79 мас%), также образуются $\text{K}_2\text{Si}_4\text{O}_9$ (12–18 мас%) и K_2SO_4 (0–3 мас%). Содержание остальных компонентов (каждого по отдельности) не превышает 2 мас%: $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$, MgSiO_3 , CaSiO_3 , KCl ,

Al_2O_3 , Fe_2O_3 . При температуре выше 680°C диоксид кремния переходит в тетрасиликат калия, при этом одновременно снижается концентрация сульфата калия в результате сплавления по реакции $\text{K}_2\text{SO}_4 + 4\text{SiO}_2 \rightarrow \text{K}_2\text{Si}_4\text{O}_9 + \text{SO}_3\uparrow$. Присутствие калия снижает температуру плавления золы из-за образования силикатов калия.

Термодинамический анализ расчетов химического состава золы пшеничной соломы показал, что во всем рассматриваемом диапазоне температур образуется $\text{K}_2\text{Si}_2\text{O}_5$ (~55 мас%), $\text{Ca}_3\text{Si}_2\text{O}_7$ (~13 мас%), KCl (0–9 мас%), K_2SO_4 (~6.9 мас%), Mg_2SiO_4 (~4.6 мас%).

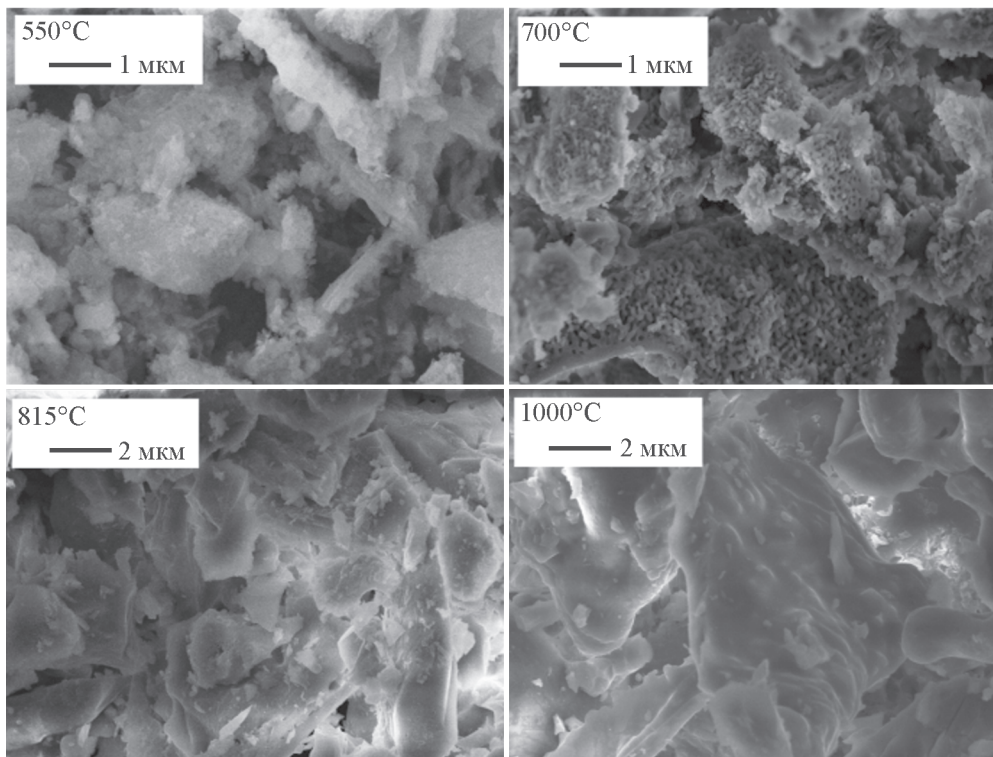


Рис. 3. Фотографии образцов золы рисовой шелухи, полученные методом сканирующей электронной микроскопии.

Содержание остальных компонентов (каждого по отдельности) не превышает 4 мас%: $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$, Na_2SiO_3 , $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$, KAlO_2 , NaFeO_2 . При температуре выше 1000°C хлорид калия начинает испаряться и постепенно переходить в газовую фазу, окончательный переход — при 1380°C . Содержание остальных неорганических соединений практически не изменяется.

Термодинамический анализ расчетов химического состава золы лузги семян подсолнечника показал, что образуется K_2O (~30 мас%), K_2SiO_3 (~17.7 мас%), KCl (8.6 мас%), K_2SO_4 (~13.4 мас%), CaO (~11 мас%), MgO (~6.5 мас%), $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ (~7 мас%) во всем диапазоне температур. Содержание остальных компонентов по отдельности не превышает 2 мас%: Na_2O , KO_2 , KAlO_2 и NaFeO_2 . При температуре выше 1340°C хлорид калия в золе семян подсолнечника и пшеничной соломы начинает испаряться и переходить в газовую фазу. Содержание остальных неорганических соединений практически не изменяется. Существование фаз диоксида кремния в золе рисовой шелухи, хлорида калия и силиката кальция в золе пшеничной соломы, хлорида калия и оксида кальция в золе лузги подсолнечника подтверждается данными рентгенофазового анализа.

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

Рентгенограмма образца золы пшеничной соломы, полученного при 550°C , показала, что основными кристаллическими фазами являются KCl , SiO_2 и Ca_2SiO_4 (рис. 4, а). При повышении температуры до 815°C снижалась интенсивность пиков хлорида калия из-за его сплавления с диоксидом кремния с образованием силикатов калия и хлороводорода, качественный состав кристаллических фаз при этом не изменялся. Рентгенограмма образца золы пшеничной соломы, полученного при 1000°C , аналогична рентгенограмме образца золы, полученного при 815°C .

При 550°C основными кристаллическими фазами образца лузги подсолнечника являются KCl , карбонат кальция-натрия $\text{Na}_2\text{Ca}(\text{CO}_3)_2$, а также метасиликат кальция-магния $\text{CaMg}(\text{SiO}_3)_2$ (рис. 4, б). При повышении температуры до 815°C появляется фаза оксида кальция из-за частичного разложения карбоната кальция-натрия. Интенсивность пиков хлорида калия снижалась, подобно случаю с образцом золы пшеничной соломы, полученным при 815°C . Рентгенограммы образцов золы лузги подсолнечника, полученных при 815 и 1000°C , идентичны.

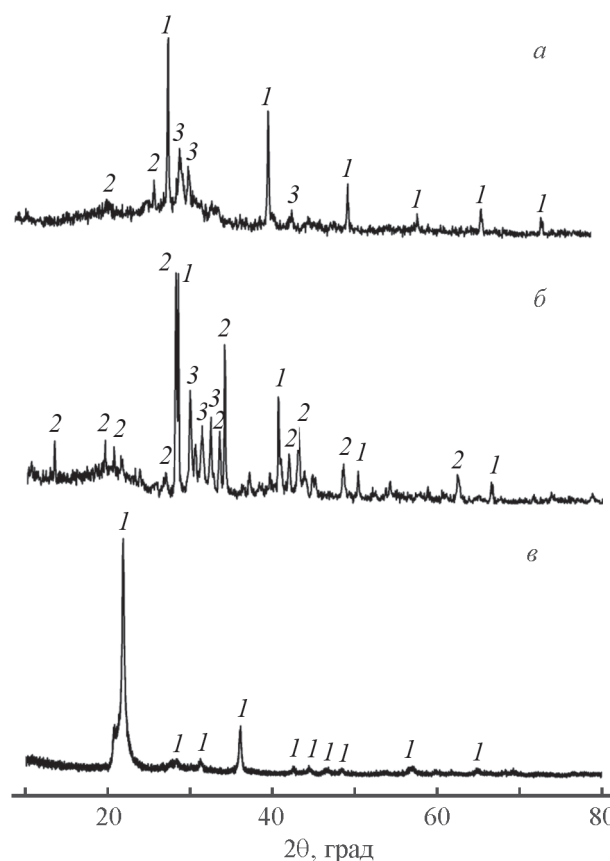


Рис. 4. Рентгенограммы образца золы пшеничной соломы, полученного при 550°C (1 — KCl , 2 — SiO_2 , 3 — Ca_2SiO_4) (а), лузги подсолнечника, полученного при 550°C [1 — KCl , 2 — $\text{Na}_2\text{Ca}(\text{CO}_3)_2$, 3 — $\text{CaMg}(\text{SiO}_3)_2$] (б), рисовой шелухи, полученного при 815°C [1 — SiO_2 (кристобалит)] (в).

Рентгенограмма образца золы рисовой шелухи, полученного при 550°C , показала, что какие-либо кристаллические фазы отсутствуют. Это можно объяснить недостаточно полным выгоранием углерода (зола серого цвета). При повышении температуры до 815°C зола белела, на рентгенограмме появляется фаза кристобалита (SiO_2) (рис. 4, в). Аналогичная картина наблюдалась с образцом золы, полученным при 1000°C , пики становились еще более выраженными.

Наиболее интенсивные изменения полос поглощения ИК-спектров золы сельскохозяйственных отходов, полученных после прокалывания при 700°C , наблюдаются в интервале $200\text{--}3500\text{ см}^{-1}$ (рис. 5). На ИК-спектрах образцов золы рисовой шелухи наблюдали полосы поглощения с максимумами при 790 и 1040 см^{-1} , что характеризует валентные колебания связи Si—O . Полосы спектров золы лузги семян подсолнечника в области 706 и 880 см^{-1} характеризуют валентные колебания (симметричные и асимметричные).

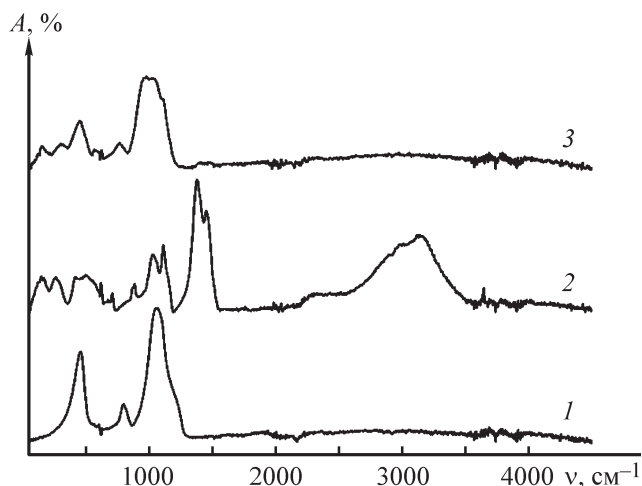


Рис. 5. ИК-Фурье-спектры золы отходов, полученных после прокаливании при 700°C.

1 — зола рисовой шелухи, 2 — зола лузги семян подсолнечника, 3 — зола пшеничной соломы.

ные соответственно) связей в карбонатных группах, а полоса 1449 cm^{-1} — валентные асимметричные колебания связей, характерных для карбонатных групп. Полоса поглощения с максимумами 616 cm^{-1} характеризует деформационные колебания сульфатной группы, а полоса поглощения с максимумом 1111 cm^{-1} — валентные колебания сульфатной группы. Широкая полоса поглощения с максимумом при 3159 cm^{-1} характеризует валентные колебания связи O—H, что говорит о присутствии гидроксидов в золе (KOH). Во всех спектрах образцов золы наблюдали полосы поглощения при 400–500 cm^{-1} , которые относятся к деформационным колебаниям кремний-кислородных группировок, что подтверждает присутствие оксида кремния и (или) силикатов в составе твердой фазы.

Выводы

В составе золы отходов растениеводства преобладают KCl, SiO₂, CaO, а также продукты реакции (сплавления) этих соединений: различные силикаты калия и кальция. Наличие сульфатов и хлоридов щелочных металлов в золе приводит к серьезным эксплуатационным проблемам: шлакованию золы в реакторе-газификаторе и коррозии внутренних поверхностей теплообменников.

Зола пшеничной соломы обладает меньшими характерными температурами плавления по сравнению с золой лузги семян подсолнечника и рисовой шелухи, зола пшеничной соломы и лузги семян подсолнечника склонна к шлакованию и обрастанию на стенках реактора в отличие от золы рисовой шелухи.

Экспериментальные данные о температурах плавления золы отходов растениеводства, полученные в работе, позволят выбрать температурные режимы горения, при которых не будет происходить плавление зольного остатка. Снизить шлакуемость золы отходов растениеводства можно путем их совместного сжигания с другими топливами (твердыми коммунальными отходами, углем), имеющими более тугоплавкую золу.

Благодарности

Определение элементного состава отходов растениеводства, микроструктуры и состава золы выполнено сотрудниками АЦКП ИПХФ РАН ст. инженером Г. В. Гусевой и с.н.с., к.ф.-м.н. Н. Н. Дрёмовой. Рентгенофазовый анализ и расшифровка рентнограмм выполнена в лаборатории структурной химии Д. В. Корчагиным и Г. В. Шиловым. ИК-спектроскопический анализ выполнен в лаборатории инженерии материалов для твердотельных устройств П. С. Барбашовой.

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 госрегистрации АААА-А19-119-022690098-3.

Конфликт интересов

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

Информация о вкладе авторов

А. Ю. Зайченко и М. В. Цветков участвовали в постановке задачи, проводили выбор объектов исследования, внесли основной вклад в написание раздела «Обсуждение результатов»; М. В. Салганская проводила эксперименты по определению характерных температур плавления золы; Д. Н. Подлесный — технический анализ образцов отходов растениеводства; В. М. Фрейман и Е. А. Салганский — термодинамические расчеты; Ю. Ю. Цветкова выполнила большую часть литературного поиска, является основным автором раздела «Экспериментальная часть».

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>

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

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

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

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

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

Список литературы

- [1] Namsaraev Z. B., Gotovtsev P. M., Komova A. V., Vasilov R. G. Current status and potential of bioenergy in the Russian Federation // *Renew. Sustain. Energ. Rev.* 2018. V. 81. P. 625–634. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.08.045>
- [2] Hupa M., Karlström O., Vainio E. Biomass combustion technology development — It is all about chemical details // *Proc. Combust. Inst.* 2017. V. 36. N 1. P. 113–134. <https://doi.org/10.1016/j.proci.2016.06.152>
- [3] Кислов В. М., Жолудев А. Ф., Кислов М. Б., Салганский Е. А. Влияние стадии пиролиза на фильтрационное горение твердых органических топлив // *ЖПХ.* 2019 Т. 92. № 1. С. 61–67. <https://doi.org/10.1134/S0044461819010080> [Kislov V. M., Zholudev A. F., Kislov M. B., Salgansky E. A. Effect of the pyrolysis step on the filtration combustion of solid organic fuels // *Russ. J. Appl. Chem.* 2019. V. 92. N 1. P. 57–63. <https://doi.org/10.1134/S1070427219010087>].
- [4] Molino A., Chianese S., Musmarra D. Biomass gasification technology: The state of the art overview // *J. Energy Chem.* 2016. V. 25. N 1. P. 10–25. <https://doi.org/10.1016/j.jechem.2015.11.005>
- [5] 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. Sci.* 2016. V. 52. P. 1–61. <https://doi.org/10.1016/j.peccs.2015.09.003>
- [6] Цветков М. В., Подлесный Д. Н., Фрейман В. М., Цветкова Ю. Ю., Салганская М. В., Зюкин И. В., Зайченко А. Ю., Салганский Е. А. О поведении золы осадка сточных вод в условиях высокотемпературной переработки // *ЖПХ.* 2020. Т. 93. № 6. С. 873–880. <https://doi.org/10.31857/S0044461820060134> [Tsvetkov M. V., Podlesniy D. N., Freyman V. M., Tsvetkova Yu. Yu., Salganskaya M. V., Zyukin I. V., Zaichenko A. Yu., Salgansky E. A. Behavior of the sewage sludge ash under the conditions of high-temperature processing // *Russ. J. Appl. Chem.* 2020. V. 93. N 6. P. 881–887. <https://doi.org/10.1134/S1070427220060154>].
- [7] Цветков М. В., Подлесный Д. Н., Фрейман В. М., Салганский Е. А., Цветкова Ю. Ю., Зюкин И. В., Зайченко А. Ю., Салганская М. В. Влияние оксида натрия на плавкость золы твердых коммунальных отходов // *Хим. физика.* 2020. Т. 39. № 8. С. 51–57. <https://doi.org/10.31857/S0207401X20080142> [Tsvetkov M. V., Podlesniy D. N., Freyman V. M., Salgansky E. A., Tsvetkova Yu. Yu., Zyukin I. V., Zaichenko A. Yu., Salganskaya M. V. Influence of sodium oxide on the fusion of solid municipal waste ash // *Russ. J. Phys. Chem. B.* 2020. V. 14. N 4. P. 647–653. <https://doi.org/10.1134/S1990793120040260>].
- [8] Lindberg D., Backman R., Chartrand P., Hupa M. Towards a comprehensive thermodynamic database for ash-forming elements in biomass and waste combustion — Current situation and future developments // *Fuel Process. Technol.* 2013. V. 105. P. 129–141. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2011.08.008>
- [9] Mlonka-Mędrala A., Magdziarz A., Gajek M., Nowińska K., Nowak W. Alkali metals association in biomass and their impact on ash melting behaviour // *Fuel.* 2020. V. 261. ID 116421. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.116421>
- [10] 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>
- [11] Guerrero F., Arriagada A., Muñoz F., Silva P., Ripoll N., Toledo M. Particulate matter emissions reduction from residential wood stove using inert porous material inside its combustion chamber // *Fuel.* 2020. V. 289. ID 119756. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.119756>
- [12] Dorofeenko S. O., Polianczyk E. V. Enhancing efficiency of hydrocarbons to synthesis gas conversion in a counterflow moving bed filtration combustion reactor // *Int. J. Hydrogen Energy.* 2019. V. 44. N 57. P. 30039–30052. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.09.208>
- [13] Lutsenko N. A., Levin V. A. Smoldering of porous media: Numerical model and comparison of calculations with experiment // *J. Phys. Conf. Ser.* 2017. V. 894. P. 1–7. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/894/1/012054>
- [14] Ibraeva K., Tabakaev R., Yazykov N., Rudmin M., Dubinin Y., Zavorin A. Flour-milling waste as a potential energy source. The study of the mineral part // *Fuel.* 2021. V. 285. ID 119240. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.119240>
- [15] Трусов Б. Г. Программная система ТЕРРА для моделирования фазовых и химических равнове-

- сий при высоких температурах // III Междунар. симп. «Горение и плазмохимия». Алмата: Казах. нац. ун-т, 2005. С. 24–26 [Trusov B. G. TERRA program system for modeling of phase and chemical equilibria at high temperatures, III Mezhdunarodnyi simpozium «Gorenie i plazmokhimiya» (III Int. Symp. «Combustion and Plasma Chemistry»). Almaty: Kaz. Nats. Univ., 2005. P. 24–26].
- [16] Pronobis M. Evaluation of the influence of biomass co-combustion on boiler furnace slagging by means of fusibility correlations // *Biomass Bioenergy*. 2005. V. 28. N 4. P. 375–383.
<https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2004.11.003>
- [17] Li Q. H., Zhang Y. G., Meng A. H., Li L., Li G. X. Study on ash fusion temperature using original and simulated biomass ashes // *Fuel Process. Technol.* 2013. V. 107. P. 107–112.
<https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2012.08.012>
- [18] Song Y. C., Li Q. T., Li F. Z., Wang L. S., Hu C. C., Feng J., Li W. Y. Pathway of biomass-potassium migration in co-gasification of coal and biomass // *Fuel*. 2019. V. 239. P. 365–372.
<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.11.023>
- [19] Li F., Yu B., Li J., Wang Z., Guo M., Fan H., Wang T., Fang Y. Exploration of potassium migration behavior in straw ashes under reducing atmosphere and its modification by additives // *Renew. Energy*. 2020. V. 145. P. 2286–2295.
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.07.141>
-