УДК 662.767.4 : 628.4.047 *Оригинальная статья*

Фазовая и структурная эволюция красных шламов при химическом циклическом риформинге метана

И.В. Шамсутов, Л.А. Пасечник, О.В. Меркулов
ФГБУН «Институт химии твердого тела Уральского отделения РАН»
620078, Россия, Екатеринбург, ул. Первомайская, 91
pasechnik@ihim.uran.ru

DOI: 10.26456/pcascnn/2026.18.976

Аннотация: Накопление красного шлама – крупнотоннажного отхода глиноземного производства – представляет серьезную экологическую проблему: при годовом объеме выбросов шламов >150 млн т коэффициент утилизации в мире не превышает 5%. В то же время полиметаллический оксидный состав шламов (Fe_2O_3 до 45-49 %, Al_2O_3, SiO_2, CaO, TiO_2, Na_2O) создает предпосылки для их использования в качестве кислородных носителей в процессах химического риформинга метана, что позволяет сочетать утилизацию отходов с получением синтез-газа. Исследованы два типа материалов: исходный красный шлам Богословского алюминиевого завода и магнетитсодержащий шлам с пониженным содержанием алюминия, полученный гидротермальным выщелачиванием исходного красного шлама. Подготовленные спеканием при 1050°C гранулы шламов (3-5 мм) испытаны в циклах «восстановление метаном – окисление кислородом воздуха» при 900°C в реакторе с неподвижным слоем; прослежена эволюция фазового состава и микроструктуры. Установлено, что в процессе циклирования оксиды железа восстанавливаются до металлического Fe, а алюмосиликатные фазы (геленит $Ca_2Al_2SiO_7$, $CaFeAlSiO_6$) выполняют роль структурного стабилизатора, предотвращая спекание частиц. Для красного шлама выход на стационарный режим с конверсией CH_4 ~75% и селективностью по CO ~85-90% происходит к 6-7 циклу; для магнетитсодержащего шлама – к 10-му циклу, что обусловлено более крупными агрегатами оксидов железа и их спеканием, а также формированием слоевой пористой структуры. При этом магнетитсодержащий шлам демонстрирует несколько бóльшую суммарную кислородную емкость. В обоих случаях отношение H_2/CO в продуктах сохраняется на уровне 1,75-1,80. Показано, что ключевым фактором долговременной стабильности является баланс между содержанием активного компонента (оксиды железа) и количеством алюмосиликатных стабилизаторов. Полученные результаты открывают перспективы направленной модификации состава красных шламов для создания эффективных и устойчивых кислородных носителей в циклических процессах переработки углеводородов.

Ключевые слова: бокситовый остаток красного шлама, кислородные носители, риформинг метана, химическое циклирование, синтез-газ, магнетит, гематит, циклическая стабильность, структурная эволюция.

Шамсутов Иван Винарисович – аспирант 3 года обучения, младший научный сотрудник лаборатории селективно проницаемой керамики и инжиниринга, ФГБУН «Институт химии твердого тела Уральского отделения РАН»
Пасечник Лилия Александровна – к.х.н., ведущий научный сотрудник лаборатории химии гетерогенных процессов, ФГБУН «Институт химии твердого тела Уральского отделения РАН»
Меркулов Олег Владимирович – к.х.н., заведующий лабораторией селективно проницаемой керамики и инжиниринга, ФГБУН «Институт химии твердого тела Уральского отделения РАН»

© И.В. Шамсутов, Л.А. Пасечник, О.В. Меркулов, 2026

Original paper

Phase and structural evolution of red muds during chemical looping reforming of methane

I.V. Shamsutov, L.A. Pasechnik, O.V. Merkulov

The Institute of Solid State Chemistry of the Ural Branch of RAS, Yekaterinburg, Russia

DOI: 10.26456/pcascnn/2026.18.976

Abstract: The accumulation of red mud – a large-tonnage waste from alumina production – poses a serious environmental challenge: with an annual waste output exceeding 150 million tons, the global utilisation rate remains below 5%. At the same time, the polymetallic oxide composition of red muds (Fe_2O_3 up to 45–49 %, Al_2O_3, SiO_2, CaO, TiO_2, Na_2O) provides opportunities for their use as oxygen carriers in chemical reforming of methane, thereby combining waste utilization with syngas production. Two types of materials were investigated: the original red mud from the Bogoslovsk Aluminum Smelter and a magnetite-enriched mud with reduced aluminum content, obtained by hydrothermal leaching of the original red mud. Granules (3-5 mm) prepared by sintering at 1050°C were tested in cyclic «methane reduction – air oxidation» runs at 900°C in a fixed-bed reactor; the evolution of phase composition and microstructure was monitored. It is established that, during cycling, iron oxides are reduced to metallic Fe, while aluminosilicate phases (gehlenite $Ca_2Al_2SiO_7$, $CaFeAlSiO_6$) acted as structural stabilisers, preventing particle sintering. For red mud, a steady-state regime with CH_4 conversion of ~75% and CO selectivity of ~85-90% is reached after 6-7 cycles; for magnetite-enriched mud this occurs after 10 cycles, which is attributed to larger aggregates of iron oxides and their sintering, as well as to the formation of a layered porous structure. At the same time, magnetite-enriched mud exhibits a slightly higher overall oxygen capacity. In both cases, the H_2/CO ratio in the products remains at 1,75-1,80. It is shown that the key factor for long-term stability is the balance between the content of the active component (iron oxides) and the amount of aluminosilicate stabilizers. The obtained results open up prospects for the targeted modification of red mud composition to create efficient and durable oxygen carriers for cyclic hydrocarbon processing.

Keywords: bauxite residue of red mud, oxygen carriers, methane reforming, chemical looping, synthesis gas, magnetite, hematite, cyclic stability, structural evolution.

Ivan V. Shamsutov – 3rd year postgraduate student, Junior Researcher, Laboratory of Selectively Permeable Ceramics and Engineering, Institute of Solid State Chemistry of the Ural Branch of RAS

Liliya A. Pasechnik – Ph. D., Leading Researcher, Laboratory of Heterogeneous Processes, Institute of Solid State Chemistry of the Ural Branch of RAS, ORCID: 0000-0002-0631-5287

Oleg V. Merkulov – Ph. D., Head of the Laboratory of Selectively Permeable Ceramics and Engineering, Institute of Solid State Chemistry, Institute of Solid State Chemistry of the Ural Branch of RAS, ORCID: 0000-0002-8275-4126

Поступила в редакцию/received: 27.07.2026; после рецензирования/revised: 30.08.2026; принята/accepted: 02.09.2026.

1. Введение

Исследование устойчивых химических процессов становится все более важным в глобальном стремлении к возобновляемой энергии и эффективному управлению отходами. Красный шлам, отход в производстве глинозема, демонстрирует огромный потенциал для использования в качестве перспективных каталитических материалов [1]. В зависимости от перерабатываемого сырья, на тонну произведенного глинозема образуется 1-1,5 тонны красного шлама. Мировое производство глинозема достигает 150 миллионов тонн в год, а количество накопленного красного шлама уже превышает 4,5 миллиарда тонн [2]. Несмотря на то, что красный шлам богат полиметаллическими оксидами, он относится к загрязнителям окружающей среды из-за своей высокой щелочности и

огромного объема производства. Большинство работ направлено на гидро- или пирометаллургическое извлечение ценных металлов [3], а также вовлечение красного шлама в строительные и дорожные материалы [4]. Мировой лидер по производству глинозема – Китай за 2023 год произвел 107 миллионов тонн красного шлама, а их использование достигло лишь 10 миллионов тонн, что дает коэффициент комплексного использования 9,8% [5]. В глобальном масштабе коэффициент использования отходов от переработки бокситов на глинозем составляет менее 5%.

Перспективным может оказаться применение красного шлама в качестве основы катализаторов, что позволит объединить цели экологической устойчивости с промышленными инновациями [6]. Каталитические свойства красного шлама обусловлены не только оксидом железа, но также и алюмосиликатными минералами [7]. Помимо оксида железа, в состав красного шлама входят оксиды Al_2O_3, SiO_2, CaO, TiO_2, Na_2O, концентрации которых зависят от типа сырья и технологии переработки. В уральских гидрохимических шламах содержание Fe_2O_3 достигает 45-49 мас.%, а соотношение Fe_2O_3/Al_2O_3 близко к таковому для синтетических кислородных носителей [2, 8, 9]. Примесные оксиды SiO_2 и TiO_2 способствуют формированию пористой структуры и могут положительно влиять как на восстановительные, так и на окислительные свойства железосодержащих носителей. В то же время, образование стабильных фаз Fe_2SiO_4 и $FeTiO_3$ ограничивает глубину восстановления и доступность кислорода [10]. Присутствие Al_2O_3 и SiO_2 позволяет стабилизировать реакционную способность Fe_2O_3 по отношению к CO в условиях псевдоожиженного слоя, а совместное присутствие с CaO и Na_2O приводит к образованию стабильных алюмосиликатов $Ca_2Al_2Si_2O_7$ и $NaAlSiO_4$ [11]. Оксиды Al_2O_3 и TiO_2, повышают механическую прочность материала при циклировании. При окислении метана ключевую роль играет доминирующая редокс-пара железа. Пара Fe_2O_3/Fe_3O_4 склонна к полному окислению метана до CO_2 и H_2O, что предпочтительно для процессов химического сжигания. В условиях получение синтез-газа, более эффективны пары с промежуточной степенью окисления Fe_3O_4/FeO и FeO/Fe, которые обеспечивают парциальное окисление метана [12].

В настоящей работе был использован исходный красный шлам после гидрохимического выщелачивания глинозема, складируемый в шламохранилище на глиноземном заводе (КШ), и магнетитсодержащий с высоким содержанием железа преимущественно в виде Fe_3O_4 (МКШ), полученный при повторном выщелачивании щелочным растворов в

присутствии $FeSO_4$ для снижения содержания алюминия и синтеза магнетита [13]. Цель работы заключалась в исследовании фазовой и структурной эволюции красного шлама в процессе химического циклирования (риформинг метана / окисление воздухом) в зависимости от его состава. Данное исследование направлено на решение важнейшей экологической проблемы утилизации красного шлама с привлечение передовых экологичных технологий для превращения отходов в ценные ресурсы.

2. Экспериментальная часть

Красный шлам (КШ) получен с Богословского алюминиевого завода (Свердловская область, Россия) с влажностью 20-30 мас.%. Гидротермальное выщелачивание исходного КШ для получения магнетитсодержащего шлама (МКШ) с низким содержанием алюминия проводили в автоклаве Parr 4560 с добавлением $Ca(OH)_2$ и $FeSO_4$ при температуре 250°C и давлении 15 атм в течение 1 часа при перемешивании со скоростью 100 об/мин. Использовали 30%-ный раствор $NaOH$ при соотношении жидкой части к КШ равном 10:1 [13]. Содержание основных компонентов шламов после сушки при 125°C в течение 24 часов приведено в Таблице 1.

Таблица 1. Химический состав шламов, мас.%.

Шлам	Fe_2O_3	Al_2O_3	CaO	SiO_2	TiO_2	Na_2O
КШ	43,4	14,1	9,86	7,12	4,01	3,35
МКШ	40,0(Fe_{tot})	5,8	12,7	10,9	4,2	2,9

Кислородный носитель на основе указанных шламов был получен путем отжига при 1050°C запрессованного порошкового материала и последующего дробления на гранулы размером около 3-5 мм, которые помещали в реактор. Реактор представлял собой кварцевую трубку с внутренним диаметром 10 мм и высотой 500 мм. В качестве топлива в реакционную зону подавали CH_4 со скоростью 5 мл/мин. Регистрацию процесса осуществляли методом газовой хроматографии, фиксируя в реальном времени соотношение выделяющихся газов H_2 к CO. Состав газов, выходящих из реактора, анализировали с помощью газового хроматографа каждые 10 минут. При превышении порогового значения соотношения H_2 к CO более 2:1 поток метана прекращали, что было необходимо для подавления побочной реакции пиролиза метана, приводящей к нецелевому углеродообразованию. Перед введением окислительной среды (воздуха) газовую систему реактор продували аргоном для полного вытеснения метана и продуктов реакции, после чего воздух подавали со скоростью 60 мл/мин в течение 40 минут.

Фазовый анализ продуктов проводили на дифрактометре Shimadzu в $CuK_{\alpha 1}$ излучении, интервал углов 10°-90°, шаг съемки 0,03°, время на точку 2 с. Химический состав определяли с помощью атомно-эмиссионной спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ICP–AES; ELAN9000, Perkin Elmer). Морфологию и распределение химических элементов в твердых образцах контролировали методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) на микроскопе JEOL JSM 6390LA, снабженном энерго-дисперсионным рентгеновским спектрометром EX-23010BU (ЭДС).

3. Результаты и обсуждение

Дифрактограммы на рис. 1 показывают разный набор фаз оксидов железа для исходных образцов КШ и МКШ. Данные химического анализа в Таблице 1 свидетельствуют о существенном снижении алюминий-содержащих фаз в МКШ по сравнению с КШ и об изменении соотношения фаз оксидов железа.

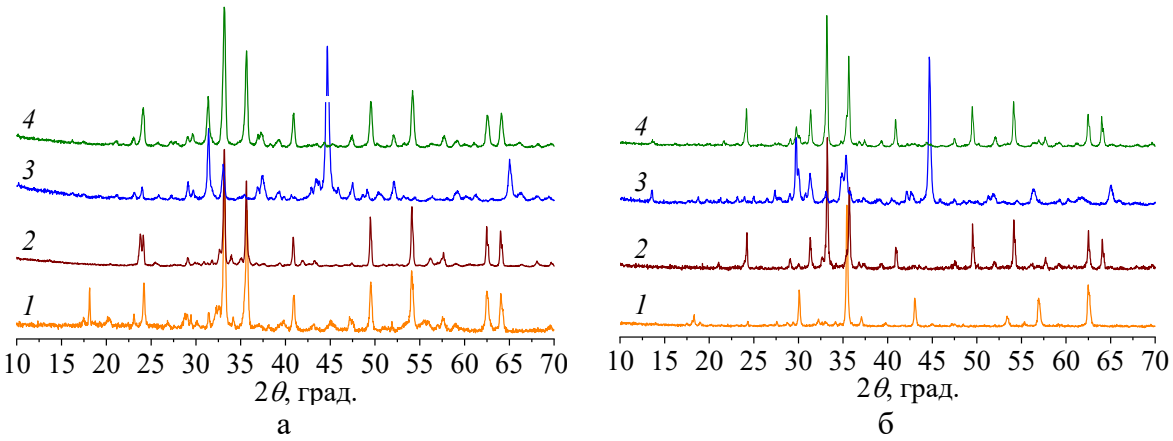
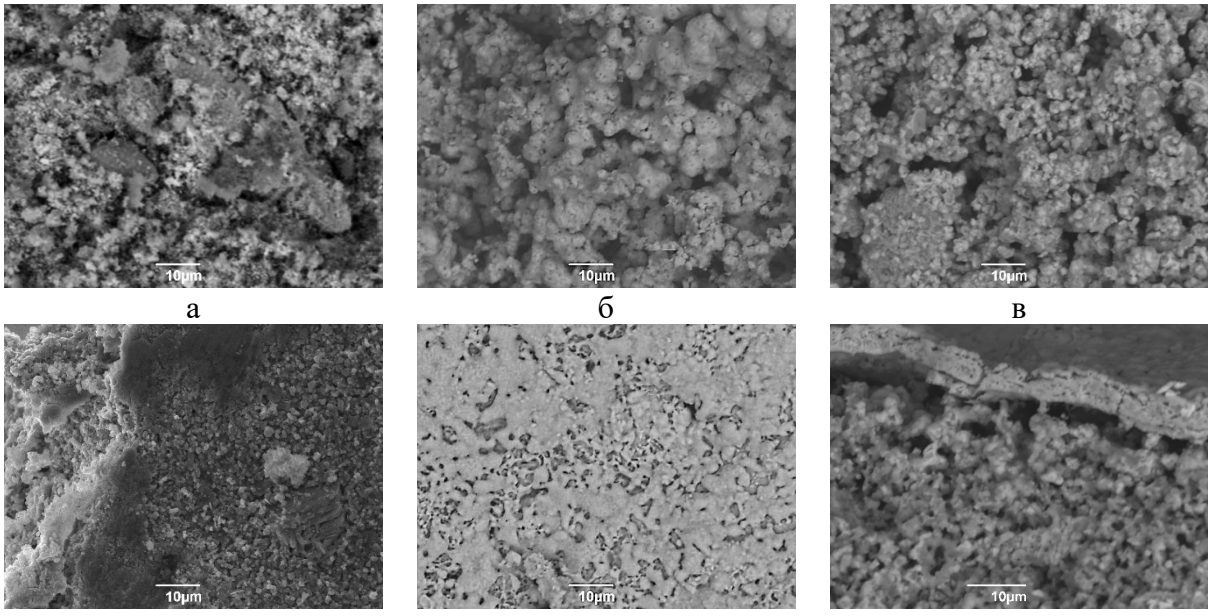


Рис. 1. Дифрактограммы КШ (а) и МКШ (б): исходных (1), гранул после отжига при 1050°C (2), после восстановления метаном (3) и после окисления на воздухе (4).

Для исходного гранулированного КШ основными кристаллическими фазами являются гематит $\alpha - Fe_2O_3$, корунд Al_2O_3, а также сложные силикаты и алюмосиликаты кальция – $Ca_3Fe_2(Si,Ti)O_{12}$, $Ca_3Al_2Si_3O_{12}$, $Ca_2Al_2SiO_7$, и рутил TiO_2. Наряду с этим присутствуют малоинтенсивные рефлексы, которые не удается однозначно идентифицировать из-за перекрытия пиков или низкой массовой доли. Для гранул МКШ, полученных при 1050°C, на дифрактограмме снова появляются рефлексы гематита и алюмосиликатов кальция, однако наиболее заметным изменением является значительное возрастание интенсивности пиков фазы $Ca_2Al_2SiO_7$ (геленит) по отношению к рефлексам $\alpha - Fe_2O_3$. Это обусловлено удалением основной массы Al_2O_3, что приводит к перераспределению оставшегося алюминия в более термодинамически стабильную

алюмосиликатную фазу геленита.

Согласно данным сканирующей электронной микроскопии, гранулы исходного шлама (КШ) представляют собой поликристаллические агрегаты, содержащими частицы размером 0,2-1 и 2-5 мкм с развитой сетью межчастичных пор (см. рис. 2 а). Удаление алюминатной составляющей при гидротермальном выщелачивании с получением МКШ приводит к заметному увеличению размера частиц вследствие формирования магнетита и росту пористости. Это согласуется с утратой стабилизирующего эффекта, обусловленного присутствием алюминатов, в условиях термической обработки (см. рис. 2 г). При этом гранулы МКШ характеризуются более высокой механической прочностью.



а б в

г д е

Рис. 2. СЭМ-изображения гранул КШ (а-в) и МКШ (г-е): до (скол – а, г) и после испытаний – поверхность (б, д) и скол (в, г). Масштабная метка 10 мкм.

Циклические испытания полученных гранул шламов в качестве кислородных носителей проводили в реакторе с неподвижным слоем при 900°С в течение 10 циклов восстановления метаном и регенерации воздухом. Такой выбор циклов позволит проследить эволюцию каталитического поведения от начального состояния к стационарному режиму.

Изучение микроструктуры показало, что в процессе циклической обработки «восстановление в метане – окисление кислородом воздуха» укрупнение оксидных частиц и оплавление их границ приводят к росту пор и каналов в гранулах обоих типов. В МКШ эти процессы дополнительно вызывают фазовую сегрегацию и формирование слоистой структуры, напоминающей «годичные кольца». В результате железосодержащие фазы

концентрируются в плотных слоях толщиной ~10 мкм (как в поверхностной корке, так и внутри гранул), а алюмосиликаты локализуются между этими слоями в виде рыхлых прослоек размером до 100 мкм (см. рис. 1 е).

Дифрактограммы образцов КШ и МКШ после восстановления метаном (см. рис. 1) показывают, что доминирующей фазой стало металлическое железо, сформировавшееся в условиях циклирования из оксидов железа. Это согласуется с высокой конверсией метана на поздних стадиях цикла и подтверждает участие металлического *Fe* в каталитическом крекинге метана. Второй по интенсивности фазой КШ является $Ca_2Al_2SiO_7$ (геленит), который стабилизирует пористую структуру гранул и предотвращает спекание частиц металлического железа. Наряду с этим присутствуют рефлексы $CaFeTiO_4$ и другие малоинтенсивные пики, идентификация которых затруднена. В образце МКШ, несмотря на более высокое содержание железа, вторые по интенсивности пики соответствуют фазе $CaFeAlSiO_6$, которая не наблюдалась в КШ. Наличие этой фазы даже после 10 циклов указывает на то, что часть железа остается «законсервированной» в силикатной форме, что может ограничивать его доступность для химических реакций восстановления-окисления.

Полученные сложные профили конверсии метана при использовании шламов в качестве кислородных носителей обусловлены ступенчатым процессом восстановления оксидов железа, а также диффузионными затруднениями, обусловленными эволюцией микроструктуры фазовых составляющих. Для КШ первые циклы характеризуются сильным спадом конверсии с 90% до ~15%, а последние – ростом до 75%. В дальнейшем к 3-му циклу наблюдается стабилизация U-образной формы кривой, а с 6-го по 10-ый циклы реакционная система выходит на стационарный режим с селективностью по *CO* ~85-90%.

Для МКШ начальные циклы также показывают спад конверсии метана с 40% со стабилизацией на уровне ~10-15%, а последние четыре – рост с 40% до 80%. U-образный профиль начинает формироваться лишь с 6-го цикла, достигая ~80% к 10-му циклу. Несмотря на большее содержание железа, ожидаемо более высокая активность МКШ не реализуется из-за более крупных агрегатов оксидов, которые восстанавливаются медленнее и задерживают структурную перестройку (рост пористости, трещинообразование). На заключительных циклах оба материала демонстрируют близкую высокую селективность по *CO*. Максимальная селективность шламов по *CO* в стационарном режиме близка (~85-90%), а соотношение H_2/CO остается в пределах 1,75-1,80 на протяжении всех циклов. При этом МКШ несколько превосходит КШ по

объему конвертированного метана за счет большей кислородной емкости, обусловленной повышенным содержанием железа. Важно, что алюмосиликатные фазы, образующиеся из примесных оксидов, предотвращают деградацию структуры гранул.

4. Заключение

В ходе циклических испытаний установлено, что оба типа шламов, как исходный гидрохимический, так и обогащенный магнетитом с более низким содержанием глинозема, обеспечивают высокую селективность по CO (~85–90 %) и близкое к целевому соотношение H_2/CO (1,75–1,80) в стационарном режиме химического риформинга метана. При этом МКШ, обладая повышенной кислородной емкостью, требует большего числа циклов для выхода на стационарный режим, что связано с более крупными агрегатами оксидов железа и замедленной эволюцией пористой структуры. Таким образом, ключевым фактором повышения каталитической активности и долговременной стабильности работы кислородных носителей на основе состава красных шламов является оптимальный баланс между содержанием активного компонента (оксиды железа) и количеством структурообразующих алюмосиликатных фаз.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда и Правительства Свердловской области (проект № 26-29-20280, https: //rscf.ru/project/26-29-20280/).

Библиографический список:

1. **Xu, H.** Red mud as the catalyst for energy and environmental catalysis: a review / H. Xu, D. Li, A. Qian et al. // Energy & Fuels. – 2024. – V. 38. – I. 15. – P. 13737-13759. DOI: 10.1021/acs.energyfuels.4c02269.
2. **Zinoveev, D.** Extraction of valuable elements from red mud with a focus on using liquid media – a review / D. Zinoveev, L. Pasechnik, M. Fedotov et al. // Recycling. – 2021. – V. 6. – I. 2. – Art. № 38. – 32 p. DOI: 10.3390/recycling6020038.
3. **Agrawal, S.** Evaluation of red mud as a polymetallic source – a review / S. Agrawal, N. Dhawan // Minerals Engineering. – 2021. – V. 171. – Art. № 107084. – 14 p. DOI: 10.1016/j.mineng.2021.107084.
4. **Mukiza, E.** Utilization of red mud in road base and subgrade materials: A review / E. Mukiza, L. Zhang, X. Liu, N. Zhang // Resources, Conservation and Recycling. – 2019. – V. 141. – P. 187-199. DOI: 10.1016/j.resconrec.2018.10.031.
5. **Li, G.** Bauxite residue (red mud) treatment: Current situation and promising solution / G. Li, J. Liu, L. Yi et al. // Science of the Total Environment. – 2024. – V. 948. – Art. № 174757. – 24 p. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.174757.
6. **Jahromi, H.** Hydrodeoxygenation of pinyon juniper catalytic pyrolysis oil using red mud supported nickel catalysts / H. Jahromi, F.A. Agblevor // Applied Catalysis B: Environmental. – 2018. – V. 236. – P. 1-12. DOI: 10.1016/j.apcatb.2018.05.008.
7. **Ramdhani, E.P.** The Si/Al ratios effect on Fe aluminosilicate from red mud for sustainable green diesel production / E.P. Ramdhani, E. Santoso, S. Jovita et al. // Molecular Catalysis. – 2025. – V. 584. – Art. № 115295. – 13 p. DOI: 10.1016/j.mcat.2025.115295
8. **Mei, D.** On a highly reactive Fe_2O_3/Al_2O_3 oxygen carrier for in situ gasification chemical looping combustion / D. Mei, A. Abad, H. Zhao et al. // Energy & Fuels. – 2014. – V. 28. – I. 11. – P. 7043-7052. DOI: 10.1021/ef501981g.
9. **Shamsutov, I.V.** Performance evaluation of $SrFe_{12}O_{19}$ and Fe_2O_3/Al_2O_3 oxygen carriers in chemical looping reforming with water splitting / I.V. Shamsutov, D.A. Ryzhov, M.A. Zavyalov et al. // Energy & Fuels. – 2024.

– V. 38. – I. 15. – P. 14534-14547. DOI: 10.1021/acs.energyfuels.4c02073.
10. **Shamsutov, I.V.** Thermodynamic screening of $SrFe_{12}O_{19}$ vs supported Fe_2O_3 oxygen carriers for chemical looping reforming with water splitting / I.V. Shamsutov, A.A. Markov, O.V. Merkulov // Industrial & Engineering Chemistry Research. – 2026. – V. 65. – I. 13. – P. 6833-6847. DOI: 10.1021/acs.iecr.5c04964.
11. **Li, C.** Evaluation of different red muds as oxygen carriers in a fluidized bed thermogravimetric analyzer / C. Li, X. Su, J. Chen et al. // Energy & Fuels. – 2021. – V. 35. – I. 18. – P. 14805-14815. DOI: 10.1021/acs.energyfuels.1c02456.
12. **Lu, C.** Thermodynamic evolution of magnetite oxygen carrier via chemical looping reforming of methane / C. Lu, R. Xu, I. Muhammad et al. // Journal of Natural Gas Science and Engineering. – 2021. – V. 85. – Art. № 103704. – 13 p. DOI: 10.1016/j.jngse.2020.103704.
13. **Pasechnik, L.A.** Composition and properties of iron oxides in the products of hydrothermal treatment of red mud and bauxites / L.A. Pasechnik, V.M. Skachkov, S.A. Bibanaeva et al. // Russian Journal of Inorganic Chemistry. – 2022. – V. 67. – I. 7. – P. 1101-1107. DOI: 10.1134/S0036023622060183.

References:

1. Xu H., Li D., Qian A. et al. Red mud as the catalyst for energy and environmental catalysis: a review, *Energy & Fuels*, 2024, vol. 38, issue 15, pp. 13737-13759. DOI: 10.1021/acs.energyfuels.4c02269.
2. Zinoveev D., Pasechnik L., Fedotov M. et al. Extraction of valuable elements from red mud with a focus on using liquid media—a review, *Recycling*, 2021, vol. 6, issue 2, art. no. 38, 32 p. DOI: 10.3390/recycling6020038.
3. Agrawal S., Dhawan N. Evaluation of red mud as a polymetallic source – a review, *Minerals Engineering*, 2021, vol. 171, art. no. 107084, 32 p. DOI: 10.1016/j.mineng.2021.107084.
4. Mukiza E., Zhang L., Liu X., Zhang N. Utilization of red mud in road base and subgrade materials: a review, *Resources, Conservation and Recycling*, 2019, vol. 141, pp. 187-199. DOI: 10.1016/j.resconrec.2018.10.031.
5. Li G., Liu J., Yi L.et al. Bauxite residue (red mud) treatment: current situation and promising solution, *Science of the Total Environment*, 2024, vol. 948, art. no. 174757, 24 p. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.174757.
6. Jahromi H., Agblevor F.A. Hydrodeoxygenation of pinyon juniper catalytic pyrolysis oil using red mud supported nickel catalysts, *Applied Catalysis B: Environmental*, 2018, vol. 236, pp. 1-12. DOI: 10.1016/j.apcatb.2018.05.008.
7. Ramdhani E.P., Santoso E., Jovita S. et al. The Si/Al ratios effect on Fe aluminosilicate from red mud for sustainable green diesel production, *Molecular Catalysis*, 2025, vol. 584, art. no. 115295, 13 p. DOI: 10.1016/j.mcat.2025.115295.
8. Mei D., Abad A., Zhao H. et al. On a highly reactive Fe_2O_3/Al_2O_3 oxygen carrier for in situ gasification chemical looping combustion, *Energy & Fuels*, 2014, vol. 28, issue 11, pp. 7043-7052. DOI: 10.1021/ef501981g.
9. Shamsutov I.V., Ryzhov D.A., Zavyalov M.A. et al. Performance evaluation of $SrFe_{12}O_{19}$ and Fe_2O_3/Al_2O_3 oxygen carriers in chemical looping reforming with water splitting, *Energy & Fuels*, 2024, vol. 38, issue 15, pp. 14534-14547. DOI: 10.1021/acs.energyfuels.4c02073.
10. Shamsutov I.V., Markov A.A., Merkulov O.V. Thermodynamic screening of $SrFe_{12}O_{19}$ vs supported Fe_2O_3 oxygen carriers for chemical looping reforming with water splitting, *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2026, vol. 65, issue 13, pp. 6833-6847. DOI: 10.1021/acs.iecr.5c04964.
11. Li C., Su X., Chen J. et al. Evaluation of different red muds as oxygen carriers in a fluidized bed thermogravimetric analyzer, *Energy & Fuels*, 2021, vol. 35, issue 18, pp. 14805-14815. DOI: 10.1021/acs.energyfuels.1c02456.
12. Lu C., Xu R., Muhammad I. et al. Thermodynamic evolution of magnetite oxygen carrier via chemical looping reforming of methane, *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2021, vol. 85, art. no. 103704. 13 p. DOI: 10.1016/j.jngse.2020.103704.
13. Pasechnik L.A., Skachkov V.M., Bibanaeva S.A. et al. Composition and properties of iron oxides in the products of hydrothermal treatment of red mud and bauxites, *Russian Journal of Inorganic Chemistry*, 2022, vol. 67, issue 7, pp. 1101-1107. DOI: 10.1134/S0036023622060183.