

МРНТИ 29.27.51; 31.15.30; 87.53.13

<https://doi.org/10.26577/RCPH.2023.v85.i2.07>**В.Е. Мессерле^{1,2} , О.А. Лаврищев^{1,3} , А.Б. Устименко^{1,2,3*} **¹Научно-исследовательский институт экспериментальной и теоретической физики, Казахский национальный университет им. Аль-Фараби, Казахстан, г.Алматы²Институт проблем горения, Казахстан, г.Алматы³Институт прикладных наук и информационных технологий, Казахстан, г.Алматы*email: ust@physics.kz

ЧИСЛЕННЫЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ПЛАЗМОТЕРМИЧЕСКОЙ ПЕРЕРАБОТКИ ЗОЛОШЛАКОВЫХ ОТХОДОВ

В данной работе представлены результаты термодинамических расчетов и экспериментальных исследований плазмотермической переработки золошлаковых отходов с получением топливного газа и инертного минерального материала. Плазмотермическая переработка золошлаковых отходов заключается в их нагреве, пиролизе и плавлении для удаления остаточного углерода и получения нейтрального расплава, складирование и использование которого после охлаждения не вызывает экологических проблем. В качестве золошлаковых отходов принята зола Экибастузского угля, широко используемого в энергетике Казахстана, представляющая собой набор компонентов минеральной массы угля и несгоревший углерод. Расчеты показали, что при плазмотермической переработке золошлаковых отходов получается горючий газ с концентрацией CO до 86.8% и теплотой сгорания 8752 кДж/кг и расплав минеральных компонентов, не содержащий вредных примесей. Плазменный реактор представляет собой охваченной электромагнитной катушкой плавильную камеру, имеющей в разрезе форму равностороннего треугольника, с тремя наклонными погружными графитовыми электродами по его углам. Запуск реактора осуществлялся через замыкание силовых электродов на насыпную графитовую дорожку. После получения канала расплава, нагрев золошлаковых отходов продолжается за счет токов проводимости между силовыми электродами через полученный расплав. Для гомогенизации расплава осуществляется его электромагнитное перемешивание. Была достигнута производительность реактора по расплаву 100 кг/ч при его температуре 1923 К и удельных энергозатратах 0.96 кВт ч/кг. Как в расчетах, так и в экспериментах вредных примесей в продуктах плазменной переработки исследованных отходов обнаружено не было.

Ключевые слова: Золошлаковые отходы, плазмотермическая переработка, синтез-газ, термодинамический расчет, эксперимент.

В.Е. Мессерле^{1,2}, О.А. Лаврищев¹, А.Б. Устименко^{1,2,3*}¹Эксперименттік және теориялық физика ғылыми зерттеу институты, Әл-Фараби ат. Қазақ ұлттық университеті, Қазақстан, Алматы қ.²Жану мәселелері институты, Қазақстан, Алматы қ.³Қолданбалы ғылымдар және ақпараттық технологиялар институты, Қазақстан, Алматы қ.*email: ust@physics.kz

Күл-қож қалдықтарын плазмотермиялық өңдеу процесін сандық және экспериментпен зерттеу

Бұл жұмыста отын газы мен инертті минералды материал ала отырып, күл-қож қалдықтарын плазмотермиялық өңдеудің термодинамикалық есептеулері мен эксперименттік зерттеулерінің нәтижелері келтірілген. Күл-қож қалдықтарын плазмотермиялық өңдеу қалдық көміртекті кетіру және бейтарап балқыманы алу үшін оларды қыздыру, пиролиздеу және балқыту болып табылады, оны сақтау және салқындағаннан кейін пайдалану экологиялық проблемаларды тудырмайды. Күл-қож қалдықтары ретінде Қазақстанның энергетикасында кеңінен қолданылатын Екібастұз көмірінің күлі қабылданды, ол көмірдің минералды массасы мен жанбаған көміртегінің құрамдас бөлігі болып табылады. Есептеулер көрсеткендей, күл-қож қалдықтарын плазмотермиялық өңдеу кезінде CO концентрациясы 86.8% дейін және жану жылуы 8752 кДж/кг болатын жанғыш газ және құрамында зиянды қоспалар жоқ минералды

компоненттердің балқымасы алынады. Плазмалық реактор-электромагниттік катушкамен қоршалған камера осіне параллель тең бүйірлі үшбұрыштың бұрыштарында орналасқан үш көлбеу батырылған графит электродтары бар балқыту камерасы. Реакторды іске қосу электр электродтарын үйінді графит жолына жабу арқылы жүзеге асырылды. Есептеулерде де, эксперименттерде де зерттелген қалдықтардың плазмалық өңдеу өнімдерінде зиянды қоспалар табылған жоқ. Балқыма арнасын алғаннан кейін күл-қож қалдықтарын қыздыру алынған Балқыма арқылы қуат электродтары арасындағы өткізгіштік токтары есебінен жалғасады. Балқыманы гомогенизациялау үшін оны электромагниттік араластыру жүзеге асырылады. Балқытылған реактордың өнімділігі 100 кг/сағ, оның температурасы 1923 К және меншікті энергия шығыны 0.96 кВт/кг болды.

Түйін сөздер: күл-қож қалдықтары, плазмотермиялық өңдеу, синтез-газ, термодинамикалық есептеу, эксперимент.

V. E. Messerle^{1,2}, O. A. Lavrichshev¹, A. B. Ustimenko^{1,2,3}

¹Institute of Experimental and Theoretical Physics Al-Farabi Kazakh National University, Kazakhstan, Almaty

²Combustion Problems Institute, Kazakhstan, Almaty

³Institute of Applied Sciences and Information Technologies, Kazakhstan, Almaty

*email: ust@physics.kz

Numerical and experimental studies of the plasma-thermal processing of ash and slag waste

This paper presents the results of thermodynamic and experimental studies of plasma-thermal processing of ash with the production of fuel gas and inert mineral material are presented. Plasma-thermal processing of ash and slag wastes consists in their heating, pyrolysis and melting to remove residual carbon and obtain a neutral melt, the storage and use of which after cooling does not cause environmental problems. Ash from Ekibastuz coal, which is widely used in the energy sector of Kazakhstan, is taken as ash and slag waste, which is a set of components of the mineral mass of coal and unburned carbon. Calculations have shown that during the plasma-thermal processing of ash and slag waste, combustible gas is obtained with a CO concentration of up to 86.8% and a calorific value of 8752 kJ/kg and a melt of mineral components that does not contain harmful impurities. The plasma reactor is a melting chamber covered by an electromagnetic coil. The chamber has the shape of an equilateral triangle in section, with three inclined immersed graphite electrodes at its corners. The reactor was started up by shorting the power electrodes to a bulk graphite track. After obtaining the melt channel, the heating of ash and slag waste continues due to the conduction currents between the power electrodes through the resulting melt. To homogenize the melt, it is stirred electromagnetically. The melt productivity of the reactor was 100 kg/h at its temperature of 1923 K and specific energy consumption of 0.96 kW h/kg. Both in calculations and in experiments, no harmful impurities were found in the products of plasma processing of the investigated wastes.

Keywords: Ash and slag waste, waste from deep oil refining, plasma-thermal processing, synthesis gas, thermodynamic calculation, experiment.

Введение

Проблема переработки и уничтожения твердых, пастообразных и жидких промышленных и бытовых отходов, включая токсичные, продолжает оставаться весьма актуальной [1–7]. При использовании сухого золошлакоудаления на пылеугольных тепловых электростанциях (ТЭС), золоотвал становится хранилищем ценных материалов с отложенным спросом и сохраненными исходными свойствами [8]. Золошлаковые отходы (ЗШО) – это разнообразные по физико-химическому состоянию вторичные ресурсы техногенного

происхождения, обладающие различной добавленной стоимостью, использование которых требует затрат для придания соответствующей потребительской привлекательности. Поэтому максимально рациональное использование материалов первичного происхождения с переработкой и утилизацией ЗШО – вот основная задача, решение которой необходимо для снижения экологической нагрузки. При отсутствии на сегодня экологически приемлемых, технологически надежных и экономически целесообразных технологий нарушается неизменность структуры биосферы и

геологической формации. Тем самым нарушается принцип защиты будущих поколений от чрезмерного эколого-экономического бремени, так как дисконтированные расходы в будущем многократно превысят сиюминутную выгоду от захоронения ЗШО. Уже сейчас заметно истощение ресурсов планеты, соответствующее правилу «Глобального природно-ресурсного потенциала в ходе исторического развития». Уже сегодня ясно, что в отходах различных производств концентрация многих редких благородных и ценных компонентов и веществ намного выше, чем в исходном природном материале и добыть их из отходов зачастую менее затратно. В настоящее время необходимо сформировать индустрию рециклинга отходов, разработать системный подход к данной проблеме, что позволит снизить нагрузку на окружающую среду, вовлечь в товарные потоки материалы техногенного происхождения, создать новые направления в индустрии и новые рабочие места. Фильтрация воды в золоотвале изменяет естественный гидрохимический режим в зоне его расположения, что может приводить к подтоплению, засолению и заболачиванию территории, поступлению загрязняющих веществ в подземные воды, а с ними – в реки и водоемы. Особо значительный вред окружающей среде причиняется при авариях на золоотвалах [9]. Достигнутый уровень мировой практики показывает, что главный эффект в решении проблемы отходов связан с их вовлечением в повторное использование. В европейских странах – лидерах отрасли утилизации и обезвреживания всех видов отходов, доля отходов, вовлеченных в повторное производство, составляет 80-87%, что значительно превышает аналогичный показатель в России и других странах СНГ и может являться ориентиром для создания новой отрасли промышленности по обработке, утилизации и обезвреживанию отходов. Анализ научно-технической литературы показал, что ЗШО находят применение в производстве теплоизоляционных материалов, стеновых блоков, тротуарной плитки, строительных смесей, в дорожном строительстве и рекультивации нарушенных земель [10 - 13].

Среди промышленных отходов одно из первых мест по объему занимают ЗШО пылеугольных ТЭС, размещаемые на золоотвалах, занимающих ценные земельные угодья и требующих значительных затрат на свое содержание и рекультивацию. Крупнейшими производителями ЗШО являются ТЭС, сжигающие высокосольные угли (Экибастузские ГРЭС-1 и ГРЭС-2, Аксуская ГРЭС, Рефтинская

ГРЭС) [14, 15]. Перспективной технологией утилизации вышеуказанных отходов является их плазменная переработка [2–7, 16 - 20]. Использование электродуговой плазмы с температурой 5000–6000 К позволяет разложить любые органические и неорганические соединения за счет интенсификация процесса деструкции по сравнению с другими способами. Кроме того, разрушение сложных соединений в плазме чрезвычайно эффективно и без наличия кислорода. А это дает возможность успешно проводить в плазме процессы пиролиза, газификации и плавления отходов, что в ряде случаев имеет значительное преимущество перед их захоронением на полигонах.

В настоящей статье представлены результаты термодинамического анализа и экспериментальных исследований плазмотермической переработки ЗШО с получением топливного газа и инертного минерального материала. В качестве ЗШО принята зола Экибастузского угля, широко используемого в энергетике Казахстана, и представляющая собой набор компонентов минеральной массы угля и несгоревший углерод. ЗШО представляют собой мелкодисперсный продукт с окраской от светло-серого до темно-серого цвета в зависимости от содержания в нем несгоревшего углерода. ЗШО представляют собой смесь из микросфер и частиц неправильной угловатой формы. С минералогической точки зрения ЗШО состоят главным образом из алюмосиликатов, также присутствуют муллит, кварц, гематит, магнетит и несгоревший углерод. ЗШО характеризуется следующим составом, масс. %: С – 5.0, SiO₂ – 54.84, Al₂O₃ – 32.77, Fe₂O₃ – 5.1, CaO – 0.81, MgO – 0.74, K₂O – 0.38, Na₂O – 0.36. По гранулометрическому составу ЗШО сравнительно однородны и представлены преимущественно частицами размером 50–100 мкм.

Цель плазмотермической переработки ЗШО заключается в ее нагреве, пиролизе и плавлении для удаления остаточного углерода и получения нейтрального расплава, складирование и использование которого после охлаждения не вызывает экологических проблем. Эта переработка осуществляется в плазменном реакторе открытого типа с электромагнитным перемешиванием расплава [16].

Методы исследования

Термодинамический расчет

Для проведения термодинамического анализа плазменной переработки отходов

использовалась универсальная программа расчета многокомпонентных гетерогенных систем TERRA, отработанная для высокотемпературных процессов [21]. Программа TERRA обладает собственной базой термодинамических свойств около 3000 индивидуальных веществ в интервале температур 300–6000 К. Расчеты выполнены в интервале температур 300–3000 К при давлении 0.101 МПа (1 атм). Состав исходной технологической смеси (масс.%): ЗШО – 100, воздух – 10.

Результаты расчетов представлены на рисунках 1 и 2. При температуре 1800 К, обеспечивающей полную газификацию остаточного углерода ЗШО при образовании его расплава, получен следующий состав горючего газа, об.%: CO – 53.9, N₂ – 42.2, SiO – 0.8, Na – 1.8, K – 1.3. Конденсированная фаза при этой температуре представлена следующими соединениями, масс.%: SiO₂ – 46.9, Al₂O₃ – 29.8, Fe₃C – 3.5, SiC – 1.7, Mg₂SiO₄ – 1.2, CaSiO₃ – 1.5.

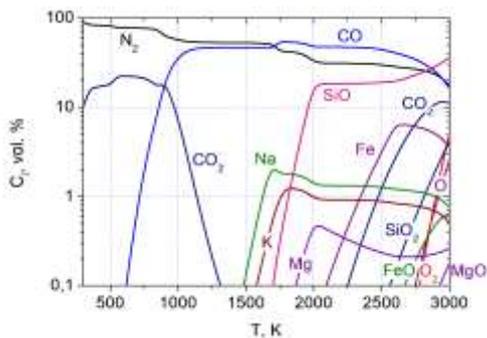


Рисунок 1 – Зависимость состава газовой фазы от температуры процесса плазмотермической переработки ЗШО

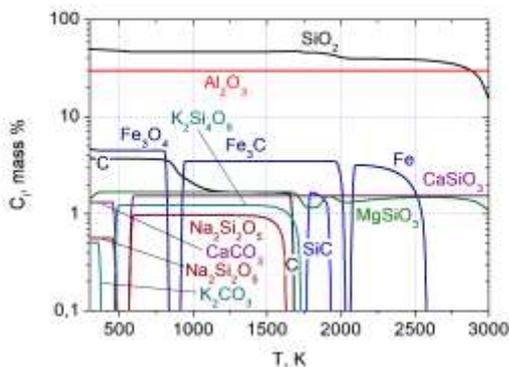


Рисунок 2 – Зависимость состава конденсированной фазы от температуры процесса плазмотермической переработки ЗШО

На рисунке 3 представлена зависимость от температуры приведенных к одному килограмму рабочего тела удельных энергозатрат на процесс плазменной переработки ЗШО. Удельные

энергозатраты при температуре 1800 К составляют 0.65 кВт ч/кг.

Расчеты показали, что при плазмотермической переработке ЗШО производится горючий газ с концентрацией CO до 86.8% и теплотой сгорания 8752 кДж/кг, что делает возможным его использование для выработки электроэнергии и теплофикации. При этом помимо горючего газа образуются конденсированные нейтральные минеральные компоненты, не представляющие угрозы для окружающей среды.

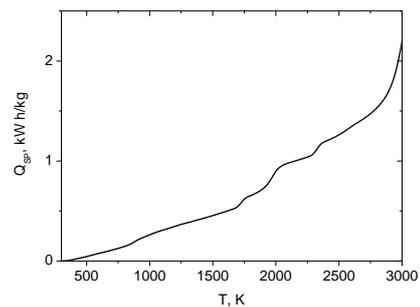


Рисунок 3 – Температурная зависимость удельных энергозатрат на процесс плазмотермической переработки ЗШО

Эксперимент

Экспериментальные исследования нагрева и плавления ЗШО выполнены в плазменном реакторе открытого типа с электромагнитным перемешиванием расплава [16–20]. Плазменный реактор представляет собой плавильную камеру с тремя наклонными погружными графитовыми электродами, расположенными по углам равностороннего треугольника параллельно оси камеры (рисунок 4). Реактор переменного тока снабжен дополнительным нейтральным центральным электродом, выполняющим роль затвора летки выпуска расплава. Реактор с вписанным диаметром камеры 0.5–0.6 м и высотой 0.6 м охватывается трехполюсным электромагнитом. Сверху плавильная камера реактора ограничена водоохлаждаемой крышкой, на которой расположены устройства ввода электродов и подачи ЗШО, а также патрубков вывода отходящих газов. Устройство подачи электродов позволяет опускать и поднимать силовые электроды для регулирования напряжения в реакторе. Снизу камера ограничена водоохлаждаемым дном, закрытым внутри огнеупорным материалом. Для контроля температуры выпускаемого расплава в отверстие графитовой летки, впесованной в водоохлаждаемую обойму, вставляется медная трубка с термопарой.

Запуск реактора осуществлялся через замыкание силовых электродов на насыпную графитовую дорожку. После получения канала расплава, нагрев ЗШО продолжается за счет токов проводимости между силовыми электродами через полученный расплав. При этом между электродами и расплавом образуются множественные электрические дуги, интенсифицирующие расплавление ЗШО. В результате взаимодействия токов проводимости с магнитным полем трехфазного электромагнита возникают силы, действующие на определенные области расплава, что обеспечивает его электромагнитное перемешивание и ускорение нагрева ЗШО, их более равномерный нагрев и гомогенизацию расплава. Подача ЗШО с фракцией размером до 5 мм осуществляется через три патрубка. Фотография реактора представлена на рисунке 5.

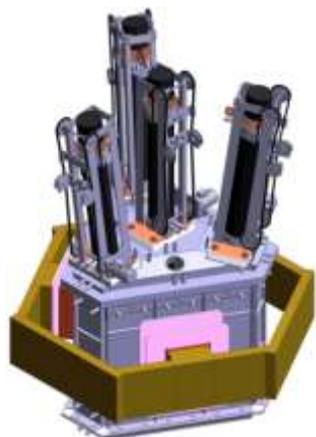


Рисунок 4 – Общий вид плазменного реактора

Эксперименты выполнены для собственно ЗШО и смеси ЗШО с базальтом при следующих массовых отношениях ЗШО/базальт: 2/3 и 1/1. Базальт позволяет снизить температуру плавления смеси. Использовался базальт следующего состава, масс. %: SiO_2 – 47.29, Fe_2O_3 – 13.56, Al_2O_3 – 12.93, CaO – 13.98, MgO – 7.91, Na_2O – 2.95, TiO_2 – 1.25, K_2O – 0.13. Была достигнута производительность плазменного реактора по расплаву 100 кг/ч при его температуре 1540–1650°C (1813–1923 К). Удельные энергозатраты на плавление ЗШО составили 0.96 кВтч/кг, а смеси ЗШО с базальтом 1/1 – 0.9 и 2/3 – 0.86 кВтч/кг. Время выхода на рабочий режим – 60 мин. Электрическая мощность реактора изменялась от 86 до 96 кВт. Во всех экспериментах была получена устойчивая яркая струя расплава. При этом температура летки для выпуска струи расплава смеси ЗШО/базальт – 2/3 составляла 950°C (1223 К), 1/1 – 970°C (1243 К), а температура расплава ЗШО

без добавки базальта – 1220 °С (1493 К). Таким образом, для получения расплава ЗШО требуется более высокая температура процесса, чем для смесей ЗШО с базальтом. Это связано с более высокой температурой плавления минеральной массы экибастузского угля из-за ее повышенного модуля кислотности, по сравнению с базальтом. Модуль кислотности определяется по следующей формуле $M_k = \frac{\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3}{\text{CaO} + \text{MgO}}$.



Рисунок 5 – Плазменный реактор с вытекающей струей расплава ЗШО

Заключение

В рамках настоящей статьи выполнены термодинамические расчеты и экспериментальные исследования плазмотермической переработки золошлаковых отходов, показавшие перспективность ее использования для утилизации отходов с получением топливного газа и инертного минерального материала.

При плазмотермической переработке золошлаковых отходов получается горючий газ с концентрацией CO до 86.8% и теплотой сгорания 8752 кДж/кг и инертный расплав минеральных компонентов, не представляющий угрозы для окружающей среды. Была достигнута производительность реактора по расплаву золошлаковых отходов 100 кг/ч при его температуре 1923 К и удельных энергозатратах на плавление золошлаковых отходов 0.96 кВт ч/кг.

Финансирование образования Республики Казахстан, гранты №
 Данное исследование финансируется АР14870548, АР14869881, АР19674754,
 Комитетом науки Министерства науки и высшего BR18574084.

Литература

- 1 Davidson G. Waste Management Practices: Literature Review. / Dalhousie University – Office of Sustainability, 2011. – 59 p.
- 2 Heberlein J., Murphy A.B. Topical review: Thermal plasma waste treatment. // Journal of Physics D: Applied Physics. – 2008. – Vol.41, No.5. – P. 053001 (20 p). <https://doi.org/10.1088/0022-3727/41/5/053001>
- 3 V.E. Messerle, A.L. Mosse, A.B. Ustimenko. Processing of biomedical waste in plasma gasifier. // Waste Management. – 2018. – Vol.79. – P.791–799. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.08.048>
- 4 Y. D. Korolev, O. B. Frants, N. V. Landl, V. G. Geyman, A. G. Karengin, A. D. Pobereznikov, Y. Kim, L. A. Rosocha, I. B. Matveev. Plasma-Assisted Combustion System for Incineration of Oil Slimes // IEEE Transactions on Plasma Science. – 2013. – Vol. 41, No. 12. – P. 3214-3222. <https://doi.org/10.1109/TPS.2013.2281058>
- 5 Surov A. V., Popov S. D., Popov V.E., Subbotin D. I., Serba E. O., Spodobin V. A., Nakonechny G. V., Pavlov A. V.. Multi-gas AC plasma torches for gasification of organic substances // Fuel. – 2017. – Vol. 203. – P. 1007–1014. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.02.104>
- 6 Аньшаков А.С., Фалеев В.А., Даниленко А.А., Урбах Э.К., Урбах А.Э. Исследование плазменной газификации углеродсодержащих техногенных отходов // Теплофизика и аэромеханика. – 2007. – Т. 14, № 4. – С. 639–650.
- 7 Мессерле В. Е., Моссэ А. Л., Устименко А. Б. Плазменная газификация углеродсодержащих отходов: термодинамический анализ и эксперимент // Теплофизика и аэромеханика. – 2016. – № 4. – С. 637-644.
- 8 Методические указания по проектированию систем пневмоудаления золы от котлоагрегатов, установок отпуска сухой золы потребителям и отгрузки ее на насыпные золоотвалы (№ РД 34.27.109–96).
- 9 А. Бернацкий, Н. Машкин. Золошлаковые отходы: опыт и перспективы использования // Газета "Энергетика и промышленность России". - май 2008 – Том 102, №10. <https://www.eprussia.ru/epr/102/7760.htm>
- 10 Э.Р. Зверева, В.П. Плотникова, Ф.И. Бурганова, Л.О. Зверев. Комплексный метод утилизации золошлаковых отходов тепловых электростанций. // Вестник КГЭУ. – 2019. – Том 42, № 2 – С. 15-26.
- 11 Zvereva E.R., Khabibullina R.V., Akhmetvalieva G.R., et al. Influence of Nanoadditives on Rheological Properties of Fuel Oil // Advances in Engineering Research. – 2017. – Vol. 133. – P. 914-920.
- 12 Zvereva E.R., Khabibullina R.V., Zueva O.S. Nano Additives Influence on Fuel Oil Properties // Solid State Phenomena. – 2017. – Vol. 265. – P. 374-378.
- 13 Zvereva E.R., Zueva O.S., Khabibullina R.V., et al. Nanomaterial Effect Study in the Viscosity Characteristics of Fuel Oil and Alternative Fuels Used at Fuel and Energy Complex Enterprises // Journal of Engineering and Applied Sciences. – 2017. – Vol. 11. – P. 2950-2954.
- 14 Гавлитин Н.В., Коломиец Ю.В. Экологически приемлемые технологии золошлакоудаления на примере Рефтинской ГРЭС ОГК-5 ЭНЕР (Россия) // Материалы IV Международного научно-практического семинара «Золошлаки ТЭС: удаление, транспорт, переработка, складирование». Москва, 19-20 апреля 2012 г. – М.: Издательский дом МЭИ, 2012. – С. 55-58.
- 15 Н.В. Гавлитин, В.Е. Мессерле, А.Б. Устименко, О.А.Лаврищев. Экологически приемлемые технологии золошлакоудаления на пилеугольных тепловых электростанциях // Вестник КазНУ. Серия физическая. – 2012. – Том 41, № 2. – С. 41-49.
- 16 V.G. Lukyashchenko, V.E. Messerle, A.B. Ustimenko, V.N. Shevchenko, S.Kh. Aknazarov, Z.A. Mansurov and K.A. Umbetkaliyev, Technology of electric melting of basalt for obtaining mineral fiber, Journal of Engineering Physics and Thermophysics – 2019 – Vol. 92, No. 1 – P. 263–270. <https://doi.org/10.1007/s10891-019-01929-321>
- 17 Патент РК №13473. Электромагнитный технологический реактор и способ его пуска / Е.Н. Карпенко, В.Г. Лукьященко, В.Е. Мессерле, А.А. Иванов, А.В. Малых // Бюл. Изобретений №10 от 16.10.2006.
- 18 Патент РК № 18229. Электромагнитный технологический реактор (варианты) и стержневой электрод, используемый в реакторе. / Лукьященко В.Г., Мессерле В.Е., Нестеренков А.Г., Шевченко В.Н., Устименко А.Б., Осадчий С.Ф., Голыш В.И., Нестеренков В.А. // Бюл. Изобретений № 1 от 16.05.2011.
- 19 Инновационный патент РК № 30483. Трехфазный электромагнитный реактор / Лукьященко В.Г., Мессерле В.Е., Акназаров С.Х., Мансуров З.А., Устименко А.Б., Умбеткалиев К.А., Шевченко В.Н. // Бюл. Изобретений №10 от 15.10.2015.

20 Патент на полезную модель РК №2473. Способ подачи перерабатываемого сырья в реакционную камеру трехфазного электромагнитного реактора и устройство для его осуществления / Лукьященко В.Г., Шевченко В.Н., Акназаров С.Х., Мансуров З.А., Мессерле В.Е., Устименко А.Б., Умбеткалиев К.А., Головченко Н.Ю.// Приоритет 04.11.2016.

21 M. Gorokhovski, E.I.Karpenko, F.C.Lockwood, V.E.Messerle, B.G.Trusov and A. B. Ustimenko, Plasma Technologies for Solid Fuels: Experiment and Theory, Journal of the Energy Institute. – 2005. – Vol. 78, No.4. – P. 157–171. <https://doi.org/10.1179/174602205X68261>

References

- 1 G. Davidson, Waste Management Practices: Literature Review, (Dalhousie University – Office of Sustainability, 2011), 59 p.
- 2 J. Heberlein, A.B. Murphy, Journal of Physics D: Applied Physics, 41 (5), 053001 (20 p) (2008).
- 3 V.E. Messerle, A.L. Mosse, A.B. Ustimenko, Waste Management, 79, 791–799 (2018).
- 4 Y.D. Korolev, O.B. Frants, N.V. Landl, V.G. Geyman, A.G. Karegin, A.D. Pobereznikov, Y. Kim, L.A. Rosocha, I.B. Matveev, IEEE Transactions on Plasma Science, 41, (12), 3214–3222 (2013).
- 5 A.V. Surov, S.D. Popov, V.E. Popov, D.I. Subbotin, E.O. Serba, V.A. Spodobin, G.V. Nakonechny, A.V. Pavlov, Multi-gas AC plasma torches for gasification of organic substances, Fuel, 203, 1007–1014 (2017).
- 6 A.S. An'shakov, V.A. Faleev, A.A. Danilenko, E.K. Urbakh, A.E. Urbakh, Thermophysics and Aeromechanics, 14 (4), 607–616 (2007).
- 7 V.E. Messerle, A.L. Mosse, A.B. Ustimenko, Thermophysics and Aeromechanics, 23 (4), 613–620 (2016).
- 8 Guidelines for the design of pneumatic ash removal systems from boiler units, installations for the delivery of dry ash to consumers and its shipment to bulk ash dumps (No PD 34.27.109–96). (In Rus.)
- 9 A. Bernatskii, N. Mushkin. Newspaper "Energetika i promyshlennost Rossii", 102 (10) (2008). (In Russ.)
- 10 E.R. Zvereva, V.P. Plotnikova, F.I. Burganova, L.O. Zverev. Vestnik KGEU, 42 (2), 15–26 (2019). (In Russ.)
- 11 E.R. Zvereva, R.V. Khabibullina, G.R. Akhmetvalieva, et al. Advances in Engineering Research, 133, 914–920 (2017).
- 12 E.R. Zvereva, R.V. Khabibullina, O.S. Zueva, Solid State Phenomena, 265, 374–378 (2017).
- 13 E.R. Zvereva, O.S. Zueva, R.V. Khabibullina, et al. Journal of Engineering and Applied Sciences. 11, 2950–2954 (2017).
- 14 N.V. Gavlitin, Yu.V. Kolomiets. Proc. of the IV Intern. scientific-practical seminar "Ashes and slags from thermal power plants: removal, transport, processing, storage". Moscow, April 19–20, 2012, (MPEI Publishing House, Moscow, 2012), 55–58. (In Rus.)
- 15 N.V. Gavlitin, V.E. Messerle, A.B. Ustimenko, O.A. Lavrichshev, Rec.Contr.Phys., 41 (2), 41–49 (2012). (In Russ.)
- 16 V.G. Lukyashchenko, V.E. Messerle, A.B. Ustimenko, V.N. Shevchenko, S.Kh. Aknazarov, Z.A. Mansurov and K.A. Umbetkaliev, Journal of Engineering Physics and Thermophysics, 92 (1), 263–270 (2019).
- 17 Patent of the Republic of Kazakhstan No.13473. Electromagnetic technological reactor and its start-up method, E.N. Karpenko, V.G. Lukyashchenko, V.E. Messerle, A.A. Ivanov, A.V. Malykh, Bul. inventions No.10, October 16 (2006). (In Russ.)
- 18 Patent of the Republic of Kazakhstan No.18229. Electromagnetic process reactor (options) and rod electrode used in the reactor, V.G. Lukyashchenko, V.E. Messerle, A.G. Nesterenkov, V.N. Shevchenko, A.B. Ustimenko, S.F. Osadchy, V.I., Golysh, V.A. Nesterenkov, Bul. Inventions No. 1, May 16 (2011). (In Russ.)
- 19 Innovative Patent of the Republic of Kazakhstan No.30483. Three-phase electromagnetic reactor, V.G. Lukyashchenko, V.E. Messerle, S.Kh. Aknazarov, Z.A. Mansurov, A.B. Ustimenko, K.A. Umbetkaliev, V.N. Shevchenko, Bull. Inventions No. 10, October 15 (2015). (In Russ.)
- 20 Patent of the Republic of Kazakhstan for utility model No.2473. The method of feeding processed raw materials into the reaction chamber of a three-phase electromagnetic reactor and a device for its implementation, V.G. Lukyashchenko, V.N. Shevchenko, S.Kh. Aknazarov, Z.A. Mansurov, V.E. Messerle, A.B. Ustimenko, K.A. Umbetkaliev, N.Yu. Golovchenko, Priority November 04, (2016). (In Russ.)
- 21 M. Gorokhovski, E.I. Karpenko, F.C. Lockwood, V.E. Messerle, B.G. Trusov and A.B. Ustimenko, Journal of the Energy Institute, 78 (4), 157–171 (2005).