



УДК 669.04-027.1

DOI: 10.31643/2020/6445.34



МРНТИ 53.07.05

К проблеме утилизации диоксида углерода отходящих газов котлов электростанций при сжигании высокозольных углей

^{*1} Диханбаев Б. И., ² Диханбаев А. Б.

^{*1} Казахский агротехнический университет им. С.Сейфуллина, Нур-Султан, Казахстан

² Алматинский Университет Энергетики и Связи, Алматы, Казахстан

* Электронная почта автора: otrar_kz@mail.ru

АННОТАЦИЯ

Производственная деятельность человечества с использованием высокозольного ископаемого вида топлива для производства электроэнергии неуклонно увеличивает золотые отходы и выбросы углекислого газа в окружающую среду. В предлагаемой статье предложен вариант безотходного сжигания экибастузского угля в плавильном реакторе, устанавливаемом под котлом; предусматривается получение, кроме пара энергетических параметров, расплава пригодного для производства строительных материалов, возгонов цинка, галлия и германия, сокращение выбросов «CO₂» в атмосферу и возврат в процесс части углерода «CO₂». На основе метода предельного энергосбережения разработана энергосберегающая тепловая схема энергетического котла на базе предложенной технологии восстановления «CO₂, H₂O» отходящих газов реактора цинковыми парами до «CO, H₂». Получаемый при этом, избыточный водород будет использоваться для вытеснения из «CO» элементарного углерода. Отработанный реагент, оксид цинка, после восстановления на цинк будет замкнуто использоваться в процессе. В случае реализации предлагаемой системы выбросы CO₂ в атмосферу сократятся до 50%, ожидаемый срок окупаемости составит 1,0 – 1,5 лет.

Ключевые слова: диоксид углерода, реактор инверсии фаз, дистилляция цинка, золотые отходы, возгоны галлия, германия.

Статья поступила: 20 июля 2020
Рецензирование: 04 августа 2020
Принята в печать: 14 октября 2020

Информация об авторах:

Диханбаев А. Б.

доктор технических наук, и.о. ассоциированного профессора кафедры теплоэнергетики Казахского Агротехнического Университета им. С. Сейфуллина. Г. Нур-Султан, Казахстан. *e-mail: otrar_kz@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0626-6139>

Диханбаев А. Б.

Старший преподаватель кафедры теплоэнергетики Алматинского Университета Энергетики и Связи, Алматы, Казахстан e-mail: arystan.d74@gmail.com

Введение

Имея 70% источников на угле и вырабатывая 80% энергии на угольных станциях Казахстан остается лидером по вредным выбросам в окружающую среду. Учитывая, что будут строиться новые тепловые станции на Балхаше, Кокшетау, Астане и Аркалыке, то опасность загрязнения окружающей среды будут расти. Ежегодный выход золы и золошлаковых смесей

при сжигании только экибастузского угля составляет около 19 млн. т, а в золоотвалах ТЭС, от сжигания только экибастузского угля, к настоящему времени накоплено более 300 млн. тонн золошлаковых отходов (ЗШО), содержащих до 5-8% остаточного углерода. Концентраций Ga, Ge в ЗШО более 200 г/т, цинка до 4%, что сравнимо с содержанием галлия, германия цинка и в исходном угле [1]. Вопросу извлечения

галлия, германия из отходящих газов сжигания угля посвящено много исследований. В [3, 4] предлагается улавливание возгонов в абсорбционных аппаратах путем орошения раствором соляной кислоты с последующим продувом раствора воздухом, что позволит получить солянокислый раствор Ge(IV) и Ga(Ш). Предшествующие работы велись в направления использования ЗШО в дорожном строительстве, производстве строительных материалов как ячеистого бетона, золобетона [2]. Однако, несмотря на их несомненную важность, все перечисленные исследования направлены на переработку отходов, следуя остаточному принципу «сначала создавать отходы, затем их «успешно» перерабатывать».

Методология

Перспективным направлением, на наш взгляд, было бы создание технологии, позволяющей безотходное сжигание экибастузского угля с выработкой за один цикл пара энергетических параметров, возгонов редкоземельных металлов, расплава пригодного для производства шлаковаты или каменного литья. Такая технология обеспечивала бы безотходность процесса и снизила бы удельную эмиссию углекислого газа в атмосферу по отношению к каждой из дополнительно выработанной продукции. Поставленная задача решалась **методом предельного энергосбережения** [6], включающий: отбор прогрессивного плавильного оборудования, формирование безотходной технологии, исключая вредные выбросы в окружающую среду и разработки энергосберегающей тепловой схемы переработки сырья.

Результаты экспериментов

Для решения указанной задачи авторы предлагают переработку Экибастузского угля методом плавления – в плавильном агрегате нового поколения «реактор инверсии фаз – вращающаяся печь» (РИФ-ВП) [5]. Опытно-промышленное испытание на установке производительностью 1,5 т/ч показали, что степень восстановления германия и цинка из «богатых» шлаков (Ge 110-115г/т. шл., Zn 10-11%) Усть - Каменегорского свинцово-цинкового комбината в реакторе инверсии фаз составил ~ 70%. Концентрация цинка в возгонах – 55-60%,

германия – 1, 4 – 1,6%. Удельный расход энергии в сопоставимых условиях в 2-3 раза ниже, чем при переработке тех же шлаков в вельцпечи Лениногорского полиметаллического комбината [6]. Установка проработала в температурном режиме расплава 1300-1400°C около 1000 часов и показала надежность конструкции плавильного агрегата [6, 7]. На рисунке 1а показан макет установки РИФ-ВП.

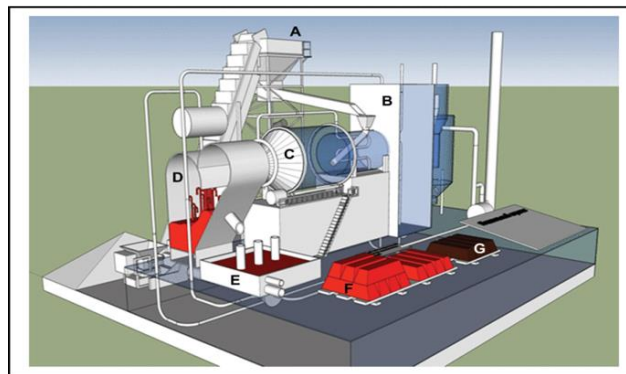


Рисунок 1а - Макет пилотной установки по переработке шлака. А - бункер, В - теплообменник, С - вращающаяся печь, D - реактор инверсии фаз, Е - электроотстойник, F - медистый чугун, G - литые камни из силикатного шлака

Обсуждение результатов экспериментов

Возгонка германия из расплава занимала особое место в экспериментах. Согласно [6] при возгонке цинка в вельцпечи галлий и германий остаются в клинкере. Последнее обстоятельство возможно объясняется высокой температурой кипения (2200°C), и низким давлением пара при 1300°C (1 мм.рт. ст.), галлия и (2850 °C, 0,7 мм.рт. ст) германия, по сравнению с цинком (900°C, 40 мм.рт. ст).

Изучение термодинамических характеристик реакций $\text{GeO} + \text{CO} = \text{Ge} + \text{CO}_2$, $\text{Ga}_2\text{O}_3 + 3\text{CO} = 2\text{Ga} + 3\text{CO}_2$, $\text{Zn} + \text{GeO} = \text{ZnO} + \text{Ge}$, $\text{Ga}_2\text{O}_3 + 3\text{Zn} = 3\text{ZnO} + 2\text{Ga}$ показывает, что значения констант равновесия для них, при температуре расплава 1300 -1400°C, находятся в диапазонах (9,868E-007 - 9,135E-012) [18]. Эти данные также приводят к мысли о малой вероятности восстановления Ge и Ga в условиях процесса.

Поэтому перед экспериментаторами встает вопрос, по какому механизму стала возможна возгонка GeO при температуре расплава 1300 - 1400°C. Результаты обсуждения приводят к выводу, что молекулы GeO могли захватываться парами цинка и выноситься из слоя расплава. Также сделано предположение, что в случае

нахождения Ga_2O_3 в шлаке, путь его возгонки может протекать по такому же механизму.

Для изучения возможности плавки смеси золы части Экибастузского угля и известняка на расплав пригодный для производства шлаковаты был произведен технологический расчет для состава ЗШО в %: SiO_2 - 60; Al_2O_3 - 25; Fe_2O_3 - 10; CaO - 5; MgO - 0,8. Соотношение: 100кг золошлак/100кг известняк. Полученные расчетные значения модуля кислотности расплава - 1,52, модуля вязкости - 1,2 и показателя водостойкости - 4,42 удовлетворяют получению шлаковаты/литых камней при температуре $1500^{\circ}C$ с вязкостью расплава 6,47 Пуаз, что позволяет легко выпускать его из летки [8].

Разработка энергосберегающей тепловой схемы

На основе экспериментальных исследований на пилотной установке по возгонке цинка и германия из металлургических шлаков и технологического расчета композиции «зола/известняк» была разработана принципиальная схема реактора инверсии фаз для безотходного сжигания экибастузского угля под котлом ТЭС [9].

Предлагаемый плавильный реактор будет встроен под холодную воронку котла и работать по следующему принципу (рисунок 16). Смесь дробленого угля и известняка, на первичной вихревой воздушной струе, будут вдуваться в каждые из горелок цилиндрических сепарационных камер реактора с двух боковых сторон. С нижних продувочных решеток будет подаваться вторичный дутьевой воздух. В сепарационных камерах будут протекать горение угля, декарбонизация известняка, химические реакции образования минералогических фаз, а в ванне формирование расплава необходимой консистенции для производства строительной продукции. За пределом реактора расплав будет направляться к следующей технологической стадии, для получения шлаковаты или каменного литья. Возгоны цинка, галлия и германия в отходящих газах реактора, после охлаждения в котле, будут улавливаться в электрофильтре.

Однако, несмотря на ожидаемую безотходность процесса сжигания угля и улучшения эксплуатационных характеристик котла, данная система не удовлетворяет

главному требованию экологии - сокращению выбросов диоксида углерода в атмосферу.

Диоксид углерода может быть отделен от воздуха или дымовых газов с помощью технологий абсорбции, адсорбции, очистки аминами, мембранного газоразделения или газогидратов. [10-16]. Конечной целью перечисленных технологий является захват CO_2 из газов, транспортировка к месту хранения и долгосрочная изоляция от атмосферы. Однако, при всей важности указанных работ в них не ставится задача утилизации CO_2 с использованием энергетической составляющей газа – углерода.

Одним из путей к решению проблемы может быть использование цинка, как реагента, преобразующего CO_2 и H_2O в CO и H_2 по формуле: $Zn+CO_2=ZnO+CO$ и $Zn+H_2O=ZnO+H_2$. Выделение углерода из его монооксида может протекать по уравнению - $CO+H_2=C+H_2O$.

Согласно [17], цинк - химически активный металл, обладает выраженными восстановительными свойствами, по активности уступает щелочноземельным металлам. Реагирует с парами воды при температуре красного каления ($550 - 650^{\circ}C$) с образованием оксида цинка и водорода.

При экспериментах на пилотной установке, [6], интенсивность протекания реакций $Zn+H_2O=ZnO+H_2$, $Zn+CO_2=ZnO+CO$ изучали во время возгонки цинка из шлака. При переходе **восстановительных** цинксодержащих газов с реактора ($t=1400-1500^{\circ}C$) во вращающуюся печь с начальной ($1400-1500^{\circ}C$) и конечной температурной зоной ($600-550^{\circ}C$), со временем пребывания потока газов в печи 2-3 секунды, следов конденсированного цинка на поверхности печи не наблюдалось. Данный результат свидетельствует о высокой скорости протекания указанных реакций.

Рисунок 2 демонстрирует восстановительную способность цинка и водорода в пределах температур $400-1000^{\circ}C$ [18]. В данном интервале все три реакции экзотермические, константы равновесия реакций растут с уменьшением температуры, что подтверждает о высокой реакционной способности цинка. В интервале температур $700 - 800^{\circ}C$ константа равновесия реакции (1) $Zn+H_2O=ZnO+H_2$ в два раза выше чем «К» реакции (2) $Zn+CO_2=ZnO+CO$, что указывает на вероятный опережающий темп развития реакции (1) перед (2). В промежутке температур

400 - 500 °C «К» реакции (3) $\text{CO} + \text{H}_2 = \text{C} + \text{H}_2\text{O}$ почти одинакова с «К» реакции (1) $\text{Zn} + \text{H}_2\text{O} = \text{ZnO} + \text{H}_2$. Из последнего можно заключить, что водород, восстановленный в (1) будет успевать расходоваться в (3).

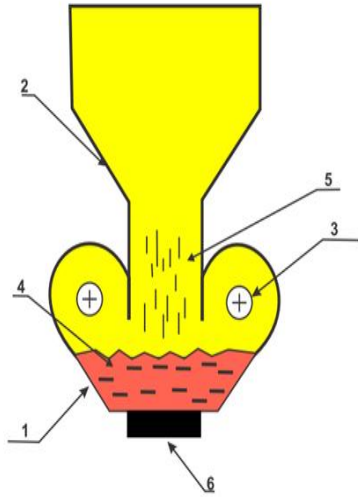


Рисунок 1б – Принципиальная схема плавильного реактора

- 1 – реактор инверсии фаз,
 2 – паровой котел электростанций,
 3 – горелки для ввода смеси экибастузского угля и известняка, 4 – ванна расплава,
 5 – газы, возгоны цинка, германия и галлия

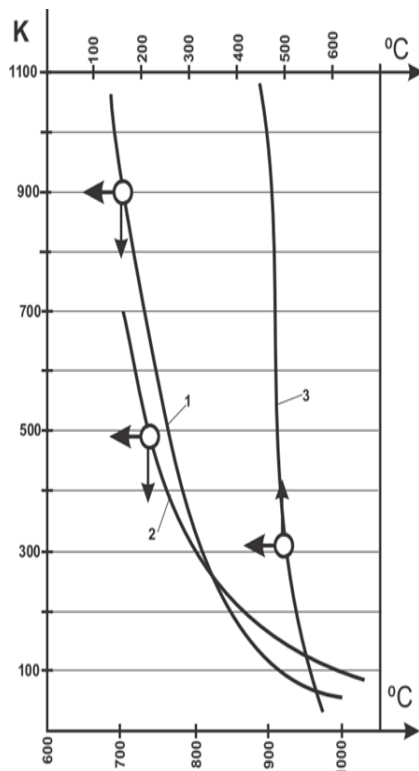


Рисунок 2 – График температурной зависимости констант равновесия реакций: 1- $\text{Zn} + \text{H}_2\text{O} = \text{ZnO} + \text{H}_2$,
 2 - $\text{Zn} + \text{CO}_2 = \text{ZnO} + \text{CO}$, 3 - $\text{CO} + \text{H}_2 = \text{C} + \text{H}_2\text{O}$

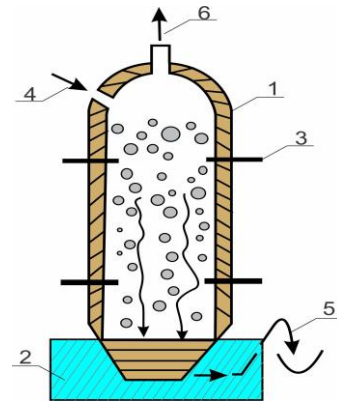


Рисунок 3 – Принципиальная схема электротермической установки «дистиллятор-конденсатор»

- Корпус установки с огнеупорной футеровкой
 1-Горн, 2- Электроды, 3-Окатыши "Zno-C", 4- Жидкий цинк, 5-CO-содержащий газ

На базе «плавильный реактор-паровой котел», разработана тепловая схема энергосберегающей, безотходной и экологически чистой системы переработки экибастузского угля показанная на рисунке 4. Принцип действия системы следующий. Процесс непрерывный. Дробленая шихта, состоящая из экибастузского угля и известняка, вдувается в реактор инверсии фаз (РИФ) 2. В РИФ шихта плавится, перегревается, возгоняется из него цинк и германий, а силикатный расплав направляется на производство строительных материалов. Окислитель – обогащенный до 30% кислородом воздух. Отходящие восстановительные газы РИФ 2 через радиационную часть котла 1 поступает в воздухоподогреватель 4 (ВЗП), Конденсированный цинк из электротермической установки «дистиллятор-конденсатор» 3, (см. рис.3), посредством водяного пара вырабатываемого в кессонах РИФ 2, диспергируется в межтрубное пространство ВЗП, 4. В межтрубном пространстве ВЗП 4 происходят основные реакции восстановления - $\text{Zn} + \text{H}_2\text{O} = \text{ZnO} + \text{H}_2$ и $\text{Zn} + \text{CO}_2 = \text{ZnO} + \text{CO}$. Отходящие газы, содержащие H_2 , CO и ZnO проходят экономайзерную камеру 5, где происходит реакция замещения - $\text{CO} + \text{H}_2 = \text{C} + \text{H}_2\text{O}$, с выделением атомарного углерода (сажи). Часть сконденсированных водяных паров выводятся из 5. Далее газы с камеры 5 состоящие из H_2O , C , ZnO поступают в электрофильтр 6 (ЭФ) для сепарации сажи (C) и возгонов ZnO от газов. Уходящие газы с ЭФ, включающие в себе в основном водяные пары и азот, с минимальным количеством CO_2 выпускаются в атмосферу.

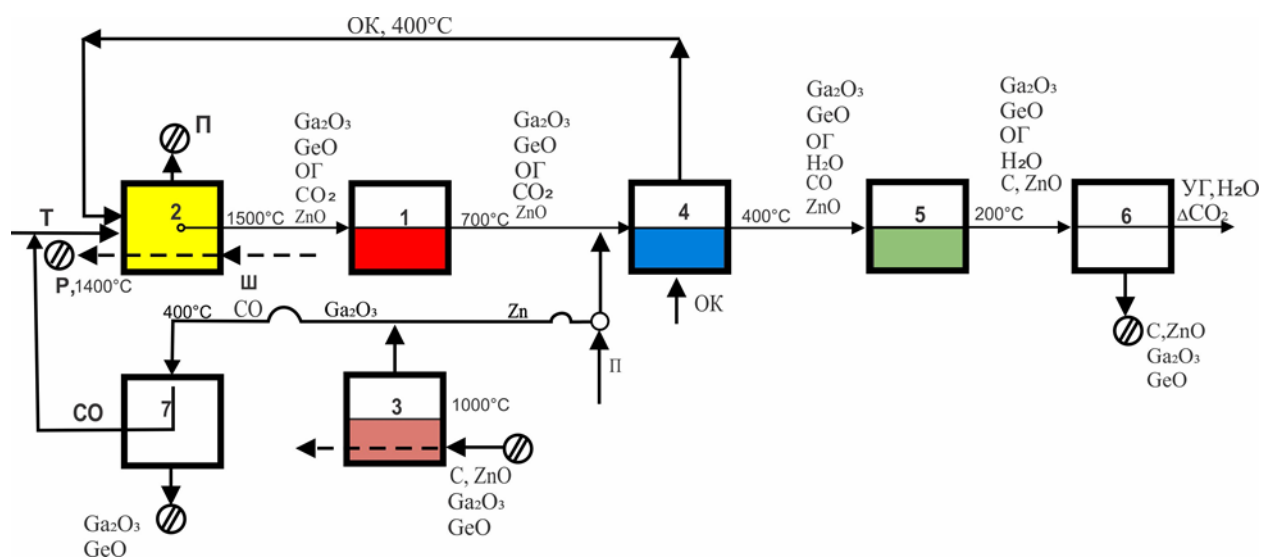


Рисунок 4 – Предлагаемая тепловая схема энергосберегающей, безотходной и экологически безопасной переработки экибастузского угля в агрегате «плавильный реактор - паровой котел», 1- радиационная часть котла, 2 – реактор инверсии фаз, 3 – установка «дистиллятор - конденсатор цинка», 4 – воздухоподогреватель, 5 –экономайзерная камера восстановления углерода из его монооксида, 6 – электрофильтр, 7 – рукавные фильтры. Ш – шихта, Р – силикатный расплав, Т – топливо, ОК – окислитель, П – пар, ОГ – отходящие газы, УГ – уходящие газы, С, СО, СО₂, Н₂О – углерод, монооксид и диоксид углерода, пары воды соответственно, Zn, ZnO, Ga₂O₃ и GeO - конденсированный цинк, возгоны цинка, галлия и германия, соответственно.

Прогнозные расчеты показывают, что при соответствующей доводке предложенной технологии выбросы CO₂ в атмосферу можно сократить до 50%. Смесь сажи (С) и возгонов (ZnO, Ga₂O₃, GeO) направляется в установку «дистиллятор - конденсатор цинка» 3, основными продуктами которой являются конденсированный цинк и СО-газ содержащий сублиматы Ga₂O₃ и GeO. СО-газ из конденсатора, после очистки от возгонов галлия и германия в рукавных фильтрах 7, направляется в РИФ в качестве дополнительного топлива.

В случае реализации, в предлагаемой системе «плавильный реактор- паровой котел» уменьшаются эксплуатационные издержки производства пара за счет сокращения плановых остановок котла на чистку поверхностей нагрева от золовых отложений и увеличения срока службы хвостовых поверхностей нагрева, связанного с абразивным золовым износом труб [19-23].

Согласно проведенного укрупненного технико-экономического обоснования предлагаемой системы, срок окупаемости котла БКЗ-450/39ф ТЭС производящего электрическую и тепловую энергию, возгонов цинка, германия и шлаковатных изделий составляет:

$$\tau = \frac{I * n}{NPV} = \frac{965959238 * 10}{7945764661} = 1.2$$

Здесь I - капитальные вложения, n – срок реализации проекта, количество лет, в течение которых будут получены годовые сэкономленные средства; NPV – чистая приведенная стоимость, разница между настоящей стоимостью всех будущих денежных потоков и первоначальным капиталовложением, с учетом банковской ставки 20%;

Таким образом, установка плавильного реактора инверсии фаз под котлом БКЗ-450/39ф и применение технологии утилизации диоксида углерода позволит кроме производства энергетической продукции, выработать возгоны цинка и германия, шлаковатных изделий, минимизировать выбросы CO₂ в атмосферу до 50% и вернуть часть углерода CO₂ в процесс в качестве топлива.

Выводы

1. Предложен плавильный реактор для безотходной переработки экибастузского угля устанавливаемом под котлом ТЭС и способ выделения из CO₂ углерода для его регенеративного использования в процессе.

2. Разработана энергосберегающая тепловая схема сжигания экибастузского угля в котлах ТЭС минимизирующая выбросы CO₂ в атмосферу до 50%.

3. Ожидается, что в случае реализации предлагаемой системы, за счет выработки возгонов цинка, галлия, германия и шлаковатных изделий, срок окупаемости инвестиции составит ~ 1 -1,5 лет.

Конфликт интересов. От имени всех авторов корреспондент автор заявляет, что конфликта интересов нет.

On the problem of utilization of carbon dioxide in waste gases of power plant boilers when burning high-ash coals

*¹ Dikhanbaev B. I., ² Dikhanbaev A. B.

¹ S. Suifullin Kazakh Agro Technical University, Nur-Sultan city, Kazakhstan

² Almaty University of Energy and Communications, Almaty, Kazakhstan

* Corresponding author email: otrar_kz@mail.ru

ABSTRACT

The production activity of mankind using high-ash fossil fuels for electricity generation is steadily increasing ash waste and carbon dioxide emissions into the environment. The article proposes a variant of wasteless combustion of Ekibastuz coal in a melting reactor installed under the boiler; it is envisaged to obtain, in addition to steam of energy parameters, a melt suitable for the production of building materials, sublimates of zinc, gallium and germanium, to reduce emissions of "CO₂" into the atmosphere and return to the process a part of carbon in "CO₂". An energy-saving thermal diagram of a power plant boiler has been developed on the basis of the proposed technology for the reduction of "CO₂, H₂O" of reactor waste gases with zinc vapor to "CO, H₂". The resulting excessive hydrogen will be used to displace elemental carbon from "CO". The spent reagent, zinc oxide, after recovering into zinc will be used again in the process. In case of implementation, CO₂ emissions into the atmosphere will be cut up to 50%, the expected payback period of the proposed system will be 1.0 - 1.5 years.

Keywords: carbon dioxide, reactor inversion phase, zinc distillation, ash waste, germanium, gallium sublimates.

Received: 20 July 2020
Peer-reviewed: 04 August 2020
Accepted: 14 October 2020

Information about authors:

Dikhanbaev B. I.

Doctor of Technical Sciences, acting Associate Professor of the Department of Thermal Power Engineering, S. Suifullin Kazakh Agro Technical University, Nur-Sultan city, Kazakhstan. e-mail: otrar_kz@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0626-6139>

Dikhanbaev A. B.

Senior Lecturer, Department of Heat Power Engineering, Almaty University of Energy and Communications, Almaty, Kazakhstan e-mail: arystan.d74@gmail.com

Жоғары күлді көмірді жағу кезінде электр станцияларының қазандықтарының қалдық газдарындағы көмірқышқыл газын пайдалану мәселесі туралы

*¹ Диханбаев Б. И., ² Диханбаев А. Б.

¹ С. Сейфуллин атындағы Қазақ Агротехникалық Университеті, Нур-Сұлтан қ, Қазақстан

² Алматы энергетика және байланыс университеті, Алматы, Қазақстан

* Corresponding author email: otrar_kz@mail.ru

ТҮЙІНДЕМЕ

Электр энергиясын өндірудегі жоғары күлді отынды пайдаланатын адамзаттың өндірістік белсенділігі қоршаған ортаға күл қалдықтары мен көмірқышқыл газының шығарылуын үнемі арттырып отырады. Ұсынылған мақалада қазандықтың астына орнатылған балқыту реакторында Екібастұз көмірін ысырапсыз жағудың нұсқасы ұсынылған; атмосфераға «CO₂» шығарындыларын азайту және технологиялық процеске ««CO₂» көміртегісінің бір бөлігін қайтару үшін энергетикалық параметрлерден басқа, құрылыс материалдарын, мырыш, галлий және германий сублиматтарын өндіруге қолайлы балқыманы алу қарастырылған. Ұсынылған технология негізінде «CO₂, H₂O» реактор газ қалдықтарын мырыш буымен «CO, H₂»-ге дейін тотықсыздандыру үшін энергияны үнемдейтін жылу схемасы жасалды. Алынған артық сутегі қарапайым көміртекті «CO» -дан ығыстыру үшін қолданылады. Жұмсалған реагент мырыш

Мақала келді: 20 шілде 2020
Рецензенттен өтті: 04 тамыз 2020
Қабылданды: 14 қазан 2020

оксиді, мырышқа дейін тотықсызданғаннан кейін, тұйықталған процесте қолданылады. Егер ұсынылған жүйе іске асырылса, атмосфераға CO₂ тастандылары 50%-ға кемиді, жұмсалған қаржы 1,0 - 1,5 жылда өтеледі.

Түйін сөздер: көмірқышқыл газы, фазаларды инверсиялау реакторы, мырышты тазарту, күл қалдықтары, германий, галлий шандары.

Авторлар туралы ақпарат:

Диханбаев Б. И.

техника ғылымдарының докторы. С. Сейфуллин атындағы Қазақ Агротехникалық Университетінің «Жылуэнергетика» кафедрасының қауымдастырылған профессоры м.а. Нур-Сұлтан қ, Қазақстан. e-mail: otrar_kz@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0626-6139>

Диханбаев А. Б.

Алматы энергетика және байланыс университетінің «Жылуэнергетика» кафедрасының аға оқытушысы, Алматы, Қазақстан e-mail: arystan.d74@gmail.com

Ссылка на данную статью: Диханбаев Б. И., Диханбаев А. Б. К проблеме утилизации диоксида углерода отходящих газов котлов электростанций при сжигании высокозольных углей // Комплексное использование минерального сырья = Complex Use of Mineral Resources = Mineraldik Shikisattardy Keshendi Paidalanu. -2020. №4(315), стр. 33-41. <https://doi.org/10.31643/2020/6445.34>

Cite this article as: Dikhanbaev B. I., Dikhanbaev A. B. K probleme utilizatsii dioksida ugleroda otkhodyashchikh gazov kotlov elektrostantsiy pri szhiganii vysokozol'nykh ugley [On the problem of utilization of carbon dioxide in waste gases of power plant boilers when burning high-ash coals]. *Комплексное Использование Минерального Сырья*. = Complex Use of Mineral Resources = Mineraldik Shikisattardy Keshendi Paidalanu. - 2020. № 4 (315), pp. 33-41. (In Rus.). <https://doi.org/10.31643/2020/6445.34>

Литература

- [1] Блайда И. А., Слюсаренко Л. И., Абишева З. Золошлаковые отходы энергетики — сырье для производства редких металлов и глинозема. // Комплексное использование минерального сырья. - № 4. - 2008. - С. 39-51. www.kimsimio.kz
- [2] Кошумбаев М. Б. Переработка промышленных и бытовых отходов. Учебное пособие. – Астана. 2018. 270с
- [3] Состав и шлакующие свойства золы ЕУ/А.Н.Александрович, В.В.Богомолов //Теплоэнергетика.1999. №5. - С.29-31.
- [4] Михайлов Юрий Леонидович. Физико-химические исследования процессов выщелачивания микрокомпонентов золы от сжигания углей Экибастузского бассейна// Автореферат диссертации на соискание степени кандидата химических наук. - 2008. – Омск. 29с.,
- [5] Диханбаев Б.И., Диханбаев А.Б. Разработка энергосберегающего способа для переработки техногенных отходов// Комплексное использование минерального сырья. –Алматы. 2019, № 4. с.82-92. <https://doi.org/10.31643/2019/6445.41>
- [6] Диханбаев А.Б., Исатаева А.К., Диханбаев Б.И. Результаты экспериментов по прямому сжиганию газа в расплаве//Материалы международной научно-практической конференции «Актуальные направления» фундаментальных и прикладных исследований. NorthCharleston, USA 2017, Vol. 3 - С. 48-51
- [7] Dikhanbaev B., Dikhanbaev A., Chandima G. Energy Efficient System for Galena Concentrate Processing// IEEEAccess. Volume 7, 2019. NewJersey, USA. PP. 23388-23395. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2895591
- [8] Dikhanbaev B., Dikhanbaev A., Chandima G. Energy-saving method for technogenic waste processing// Journal PLoS ONE 12(12). IF – 3.54. - San Francisco, California, USA. 2017. – December 27, – P.1-16. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0187790>
- [9] Диханбаев А.Б.Диханбаев Б.Перспективы безотходного сжигания екибастузского угля под котлом тепловых электрических станций// Материалы VII Международной научно-практической конференции «Academic science – problems and achievements» - 2015, - North Charleston, USA, -V.2 - С.211-217
- [10] Fanchi, John R; Fanchi, Christopher J (2016). Energy in the 21st Century. World Scientific Publishing Co Inc. p. 350. ISBN 978-981-314-480-4.
- [11] IPCC special report on Carbon Dioxide Capture and Storage. Prepared by working group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Metz, B., O. Davidson, H. C. de Coninck, M. Loos, and L.A. Meyer (eds.). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 442 pp. Available in full at www.ipcc.ch Archived 2010-02-10 at the Wayback Machine (PDF - 22.8MB). Grantham 2019, p. 9
- [12] Rhodes, J. S.; Keith, D. W. (2008). "Biomass with capture: Negative emissions within social and environmental constraints: An editorial comment". *Climatic Change*. 87 (3–4): 321–328. doi:10.1007/s10584-007-9387-4.
- [13] Werner, Constanze; Schmidt, Hans-Peter; Gerten, Dieter; Lucht, Wolfgang; Kammann, Claudia (2018). "Biogeochemical potential of biomass pyrolysis systems for limiting global warming to 1.5° C". *Environmental Research Letters*. 13 (4): 044036. doi:10.1088/1748-9326/aabb0e.
- [14] Phelps, J; Blackford, J; Holt, J; Polton, J (2015), "Modelling Large-Scale CO2 Leakages in the North Sea", *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 38: 210–220, doi:10.1016/j.ijggc.2014.10.013
- [15] Sumida, Kenji; Rogow, David L.; Mason, Jarad A.; McDonald, Thomas M.; Bloch, Eric D.; Herm, Zoey R.; Bae, Tae-Hyun; Long, Jeffrey R. (2012). "Carbon Dioxide Capture in Metal–Organic Frameworks". *Chemical Reviews*. 112 (2): 724–781. doi:10.1021/cr2003272. PMID 22204561.

- [16] Bryngelsson, Mårten; Westermark, Mats (2009). "CO₂ capture pilot test at a pressurized coal fired CHP plant". *Energy Procedia*. 1: 1403–1413. doi:10.1016/j.egypro.2009.01.184.
- [17] Michael E. Wieser, Norman Holden, Tyler B. Coplen, John K. Böhlke, Michael Berglund, Willi A. Brand, Paul De Bièvre, Manfred Gröning, Robert D. Loss, Juris Meija, Takafumi Hirata, Thomas Prohaska, Ronny Schoenberg, Glenda O'Connor, Thomas Walczyk, Shige Yoneda, Xiang-Kun Zhu. Atomic weights of the elements 2011 (IUPAC Technical Report) (англ.) // *Pure and Applied Chemistry*. — 2013. — Vol. 85, no. 5. — P. 1047—1078. — doi:10.1351/PAC-REP-13-03-02
- [18] OutokumpuHSC Chemistry for Windows. Chemical Reaction and Equilibrium Software with Extensive Thermochemical Database. Version 5.1. October 31, 2002.
- [19] Инновационный патент 31572 на изобретение. Республика Казахстан. Способ переработки цинксодержащих шлаков шахтной плавки. / Диханбаев Б.И., Рахматулина А.К., Жумабекова А.Ж. опубл. 30.09.2016, бюл. №12-4.
- [20] Баубеков К.Т. Вредные выбросы в продуктах сгорания газомазутных котлов (корреляционный анализ и опытно-промышленные исследования). – Астана: КАТУ им. С. Сейфуллина, 2017. – 384 с.
- [21] Баубеков К.Т. Технологические методы снижения токсичности выбросов и перспективы разработки экологически безопасных газомазутных котлов (обзор проблем, аналитические и промышленные исследования). – Астана: КАТУ им. С. Сейфуллина, 2016. – 237 с.
- [22] Баубеков К.Т. Повышение экологической безопасности газомазутных котлов. Lambert Academic Publishing. Германия, 2018. – 283 с.
- [23] Баубеков К.Т. Инновационные технологии сжигания в газомазутных котлах (обзор проблем, аналитические и промышленные исследования). Lambert Academic Publishing. Германия, 2018. – 384 с.

Reference

- [1] Blyda I. A., Slyusarenko L. I., Abisheva Z. Zoloshlakovyve otkhody energetiki — syr'ye dlya proizvodstva redkikh metallov i glinozema [Ash and slag waste from the power industry - raw material for the production of rare metals and alumina]. // *Kompleksnoe Ispol'zovanie Mineral'nogo Syr'a. = Complex Use of Mineral Resources = Mineraldik Shikisattardy Keshendi Paidalanu. - No. 4. - 2008. - P. 39-51. (in Russ).*
- [2] Koshumbaev M. B. Pererabotka promyshlennykh i bytovykh otkhodov. Uchebnoye posobiye [Processing of industrial and household waste]. Tutorial. - Astana. 2018.270p. (in Russ).
- [3] Sostav i shlakuyushchiye svoystva zoly YEU/A.N.Alekhanovich, V.V. Bogomolov // *Teploenergetika [Composition and slagging properties of Ekibastuz Coal's ash / A.N. Alekhanovich, V.V. Bogomolov // Heat Power Engineering]. 1999.- No. 5.- P.29-31. (in Russ).*
- [4] Mikhailov Yuri Leonidovich. Fiziko-khimicheskiye issledovaniya protsessov vyzhelachivaniya mikrokomponentov zoly ot szhiganiya ugley Ekibastuzskogo basseyna // *Avtoreferat dissertatsii na soiskaniye stepeni kandidata khimicheskikh nauk [Physicochemical studies of the processes of leaching of microcomponents of ash from coal combustion in the Ekibastuz basin // Abstract of the thesis for the degree of candidate of chemical sciences]. - 2008. - Omsk. 29p. (in Russ).*
- [5] Dikhanbaev B.I., Dikhanbaev A.B. Razrabotka energosberegayushchego sposoba dlya pererabotki tekhnogennykh otkhodov [Development of an energy-saving method for processing industrial waste] // *Kompleksnoe Ispol'zovanie Mineral'nogo Syr'a. = Complex Use of Mineral Resources = Mineraldik Shikisattardy Keshendi Paidalanu. Almaty. 2019, No. 4. p.82-92. https://doi.org/10.31643/2019/6445.41 (in Russ).*
- [6] Dikhanbaev A.B., Isataeva A.K., Dikhanbaev B.I. Rezul'taty eksperimentov po pryamomu szhiganiyu gaza v rasplave // *Materialy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Aktual'nyye napravleniya» fundamental'nykh i prikladnykh issledovaniy [Results of experiments on direct combustion of gas in a melt // Materials of the international scientific-practical conference "Actual directions" of fundamental and applied research]. North Charleston, USA 2017, Vol. 3 - C. 48-51 (in Russ).*
- [7] Dikhanbaev B., Dikhanbaev A., Chandima G. Energy Efficient System for Galena Concentrate Processing // *IEEEAccess. Volume 7, 2019. New Jersey, USA. PP. 23388-23395. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2895591 (In Eng.).*
- [8] Dikhanbaev B., Dikhanbaev A., Chandima G. Energy-saving method for technogenic waste processing // *Journal PLoS ONE 12(12). IF – 3.54. - San Francisco, California, USA. 2017. – December 27, – P.1-16. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0187790 (In Eng.).*
- [9] Dikhanbaev A.B. Dikhanbaev B. Perspektivy bezotkhodnogo szhiganiya yekibastuzskogo uglya pod kotlom teplovykh elektricheskikh stantsiy [Prospects of waste-free combustion of Ekibastuz coal under the boiler of thermal power plants] // *Proceedings of the VII International scientific and practical conference "Academic science - problems and achievements" - 2015, - North Charleston, USA, -V.2 - P .211-217. (in Russ).*
- [10] Fanchi, John R; Fanchi, Christopher J (2016). *Energy in the 21st Century*. World Scientific Publishing Co Inc. p. 350. ISBN 978-981-314-480-4. (In Eng.).
- [11] IPCC special report on Carbon Dioxide Capture and Storage. Prepared by working group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Metz, B., O. Davidson, H. C. de Coninck, M. Loos, and L.A. Meyer (eds.). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 442 pp. Available in full at www.ipcc.ch Archived 2010-02-10

- at the Wayback Machine (PDF - 22.8MB). Grantham 2019, p. 9. (In Eng.).
- [12] Rhodes, J. S.; Keith, D. W. (2008). "Biomass with capture: Negative emissions within social and environmental constraints: An editorial comment". *Climatic Change*. 87 (3–4): 321–328. doi:10.1007/s10584-007-9387-4. (In Eng.).
- [13] Werner, Constanze; Schmidt, Hans-Peter; Gerten, Dieter; Lucht, Wolfgang; Kammann, Claudia (2018). "Biogeochemical potential of biomass pyrolysis systems for limiting global warming to 1.5° C". *Environmental Research Letters*. 13 (4): 044036. doi: 10.1088/1748-9326/aabb0e. (In Eng.).
- [14] Phelps, J; Blackford, J; Holt, J; Polton, J (2015), "Modelling Large-Scale CO2 Leakages in the North Sea", *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 38: 210–220, doi: 10.1016/j.ijggc.2014.10.013. (In Eng.).
- [15] Sumida, Kenji; Rogow, David L.; Mason, Jarad A.; McDonald, Thomas M.; Bloch, Eric D.; Herm, Zoey R.; Bae, Tae-Hyun; Long, Jeffrey R. (2012). "Carbon Dioxide Capture in Metal–Organic Frameworks". *Chemical Reviews*. 112 (2): 724–781. doi: 10.1021/cr2003272. PMID 22204561. (In Eng.).
- [16] Bryngelsson, Mårten; Westermarck, Mats (2009). "CO2 capture pilot test at a pressurized coal fired CHP plant". *Energy Procedia*. 1: 1403–1413. doi: 10.1016/j.egypro.2009.01.184. (In Eng.).
- [17] Michael E. Wieser, Norman Holden, Tyler B. Coplen, John K. Böhlke, Michael Berglund, Willi A. Brand, Paul De Bièvre, Manfred Gröning, Robert D. Loss, Juris Meija, Takafumi Hirata, Thomas Prohaska, Ronny Schoenberg, Glenda O'Connor, Thomas Walczyk, Shige Yoneda, Xiang-Kun Zhu. *Atomic weights of the elements 2011 (IUPAC Technical Report) (англ.) // Pure and Applied Chemistry*. — 2013. — Vol. 85, no. 5. — P. 1047—1078. — doi: 10.1351/PAC-REP-13-03-02. (In Eng.).
- [18] OutokumpuHSC Chemistry for Windows. *Chemical Reaction and Equilibrium Software with Extensive Thermochemical Database*. Version 5.1. October 31, 2002. (In Eng.).
- [19] Innovatsionnyy patent 31572 na izobreteniyе. Respublika Kazakhstan. Sposob pererabotki tsinksoderzhashchikh shlakov shakhtnoy plavki [Innovative patent 31572 for the invention. The Republic of Kazakhstan. Method for processing zinc-containing slag from mine smelting]. / Dikhanbaev, B.I., Rakhmatulina A.K., Zhumabekova A.Zh. publ. 09/30/2016, bulletin No. 12-4s: ill. (in Russ).
- [20] Baubekov K.T. Vrednyye vybrosy v produktakh sgoraniya gazomazutnykh kotlov (korrelyatsionnyy analiz i opytno-promyshlennyye issledovaniya) [Hazardous emissions in combustion products of gas-oil boilers (correlation analysis and pilot studies)]. - Astana, 2017. -- 384 p. (in Russ).
- [21] Baubekov K.T. Tekhnologicheskiye metody snizheniya toksichnosti vybrosov i perspektivy razrabotki ekologicheskoy bezopasnykh gazomazutnykh kotlov (obzor problem, analiticheskkiye i promyshlennyye issledovaniya) [Technological methods for reducing the toxicity of emissions and prospects for the development of environmentally friendly gas-oil boilers (review of problems, analytical and industrial research)]. - Astana, 2016. - 237 p. (in Russ).
- [22] Baubekov K.T. Povysheniye ekologicheskoy bezopasnosti gazomazutnykh kotlov. Lambert Academic Publishing [Improving the environmental safety of gas-oil boilers. Lambert Academic Publishing]. Germany, 2018. 283 p. (in Russ).
- [23] Baubekov K.T. Innovatsionnyye tekhnologii szhiganiya v gazomazutnykh kotlakh (obzor problem, analiticheskkiye i promyshlennyye issledovaniya) [Innovative combustion technologies in gas-oil boilers (review of problems, analytical and industrial studies)]. Lambert Academic Publishing. Germany, 2018. -- 384 p. (in Russ).