

или магнитных элементов с использованием термоэлектрических элементов, например термопар. 2013.

2. Автоматизация контроля параметров плавки / С.Ю. Калякулин, Э.В. Митин, Т.В. Травкина // XLVI Огарёвские чтения. Издательство: Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва. 2017. – С. 150-154.

3. Информационные системы в металлургии / Н.А. Спиринов, Ю.В. Ипатов, В.Н. Лобанов [и др.]. – Екатеринбург: УГТУ–УПИ, 2001. – 617 с.

4. Непрерывный контроль температуры жидкой стали в технологических агрегатах металлургического производства / Б.Н. Парсункин., С.М. Андреев, А.Р. Бондарева, У.Б. Ахметов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». 2018. Т. 18, № 3. – С. 33-41.

5. Арутюнов В.А. Математическое моделирование тепловой работы промышленных печей: учебник для вузов / В.А. Арутюнов, В.В. Бухмиров, С.А. Крупенников. – М.: Металлургия, 1990. – 239 с.

6. Автоматизация и оптимизация управления технологическими процессами внепечной доводки стали / Е.Н. Ишметьев, С.М. Андреев, Б.Н. Парсункин [и др.]. – Магнитогорск: изд-во Магнитогорского гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2008. – 311 с.

УДК 662.613.1

Е. А. Ткаченко, Г. Е. Масленников, Т. Ф. Богатова

ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет

имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург, Россия

КАРБОНИЗАЦИЯ ОКСИДА КАЛЬЦИЯ И ЛЕТУЧЕЙ ЗОЛЫ МУСОРΟΣЖИГАТЕЛЬНОГО ЗАВОДА ДЛЯ СЕКВЕСТРАЦИИ ДИОКСИДА УГЛЕРОДА

***Аннотация.** Рассмотрена основная движущая сила изменения климата – выбросы парниковых газов, основным источником которых является двуокись углерода. В статье описана стратегия улавливания и связывания углекислого газа, которая включает одну из перспективных технологий – карбонизацию. Проведены экспериментальные исследования методом термогравиметрического анализа процесса взаимодействия образца оксида кальция и образца летучей золы мусоросжигательного завода с характерными газовыми компонентами уходящих газов ТЭС. Получены данные термического и газового анализа для каждого образца. По методике, предложенной Университетом Ньюкасл (Австралия), найдены такие ключевые параметры карбонизации оксида кальция и летучей золы, как степень конверсии, энергия активации, и предэкспоненциальный множитель. Проведено сравнение взаимодействия оксида кальция и летучей золы мусоросжигательного завода с диоксидом углерода.*

Ключевые слова: карбонизация; летучая зола; оксид кальция; улавливание и связывание углекислого газа; термогравиметрический анализ.

Abstract. *Considered the main driver of climate change - greenhouse gas emissions, the main source of which is carbon dioxide. The article describes a strategy for capturing and sequestering carbon dioxide, which includes one of the promising technologies - carbonization. Experimental studies were carried out by thermogravimetric analysis of the process of interaction between a sample of calcium oxide and a sample of fly ash from a waste incineration plant with characteristic gas components of exhaust gases from a thermal power plant. Thermal and gas analysis data were obtained for each sample. According to the method proposed by the University of Newcastle (Australia), such key parameters of carbonization of calcium oxide and fly ash as the degree of conversion, activation energy, and pre-exponential factor were found. The interaction of calcium oxide and fly ash from an incineration plant with carbon dioxide is compared.*

Key words: *carbonization; fly ash; calcium oxide; capturing and sequestering carbon dioxide; thermogravimetric analysis.*

Двуокись углерода (CO_2) является основным источником выбросов парниковых газов и основной движущей силой изменения климата. Многие исследования демонстрируют, что использование CO_2 может стать движущей силой будущего развития технологий улавливания и использования углерода. Однако, учитывая количество CO_2 , производимое во всем мире, даже если оно может быть уменьшено в ближайшем или среднесрочном будущем, улавливание и хранение углерода останутся основной стратегией, и поэтому необходима разработка дополнительных технологий [1].

Улавливание и связывание углекислого газа (CO_2) включает ряд технологий, которые потенциально могут улавливать миллиарды тонн CO_2 в год. Одной из перспективных технологий является карбонизация – процесс, в котором CO_2 химически реагирует с материалами, содержащими Ca и/или Mg, с образованием стабильных карбонатов. В данной статье рассматривается карбонизация оксида кальция и летучей золы мусоросжигательного завода.

Экспериментальные исследования процесса карбонизации оксида кальция и золы мусоросжигательного завода были проведены с целью изучения взаимодействия CaO и летучей золы с различными газами-реагентами (H_2O , CO_2 , N_2 , Ar). Эксперименты проводились на анализаторе *NETZSCH STA 449 F3* методом ТГА, во время разогрева печи весами анализатора фиксировалось изменение массы навески, масс-спектрометром записывался газовый состав образующихся продуктов. Параметры проведенных экспериментов приведены в таблице 1.

Результаты экспериментов 793 и 856 представлены на рис. 1. В эксперименте №793 процесс гидратации образца CaO проходил в диапазоне 300-865 °C, при дальнейшем нагреве происходил обратный процесс с существенным снижением массы. Снижение массы в диапазоне температур 865-1000 °C связано с разложением примесей, содержащихся в исходном образце CaO. В аналогичном эксперименте с образцом летучей золы мусоросжигательного завода, процесс гидратации проходил в диапазоне 350-850 °C. На графике видно, что степень конверсии образца CaO значительно выше, чем у летучей золы.

Температурная программа экспериментов №867 и №855 отличается от вышеописанных. При температуре 570 °C (670 °C) происходило переключение с N_2 на CO_2 в составе дутья, при этом не прекращалась подача пара. Процесс изменения массы образцов представлены на рис. 2. В эксперименте №867 после

ввода CO_2 начался резкий рост массы (диапазон 570-830 °С) за счет процесса карбонизации CaO с образованием карбоната кальция CaCO_3 . В эксперименте с летучей золой мусоросжигательного завода процесс гидратации протекал в диапазоне 670-800 °С. При достижении 820 °С в обоих экспериментах начиналось резкое снижение массы, также связанное с разложением карбонатов. Степень конверсии в эксперименте №867 значительно превышает степень конверсии в эксперименте №855.

Таблица 1

Параметры экспериментов карбонизации оксида кальция

№ эксперимента	Масса навески, мг	Состав дутья, % об.	Температурная программа	Скорость нагрева, °С /мин
793 (CaO)	30	100% CO_2	Нагрев до 1000 °С	20
856 (зола)	30	100% CO_2	Нагрев до 1000 °С	20
867 (CaO)	30	50% N_2 + 50% H_2O	Нагрев до 570 °С	20
		50% CO_2 + 50% H_2O	Нагрев от 570 °С до 1000 °С	
855 (зола)	30	50% N_2 + 50% H_2O	Нагрев до 670 °С	20
		50% CO_2 + 50% H_2O	Нагрев от 670 °С до 1000 °С	

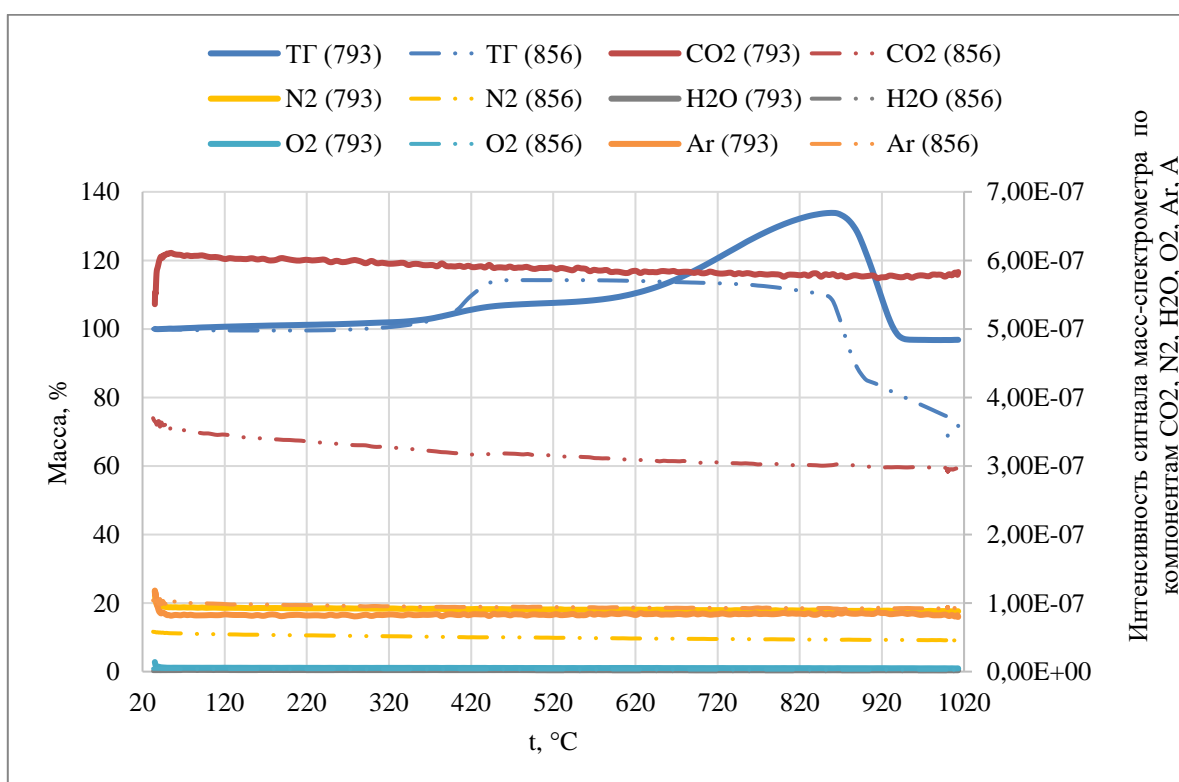


Рис. 1. Данные термического и газового анализа экспериментов №793 и №856

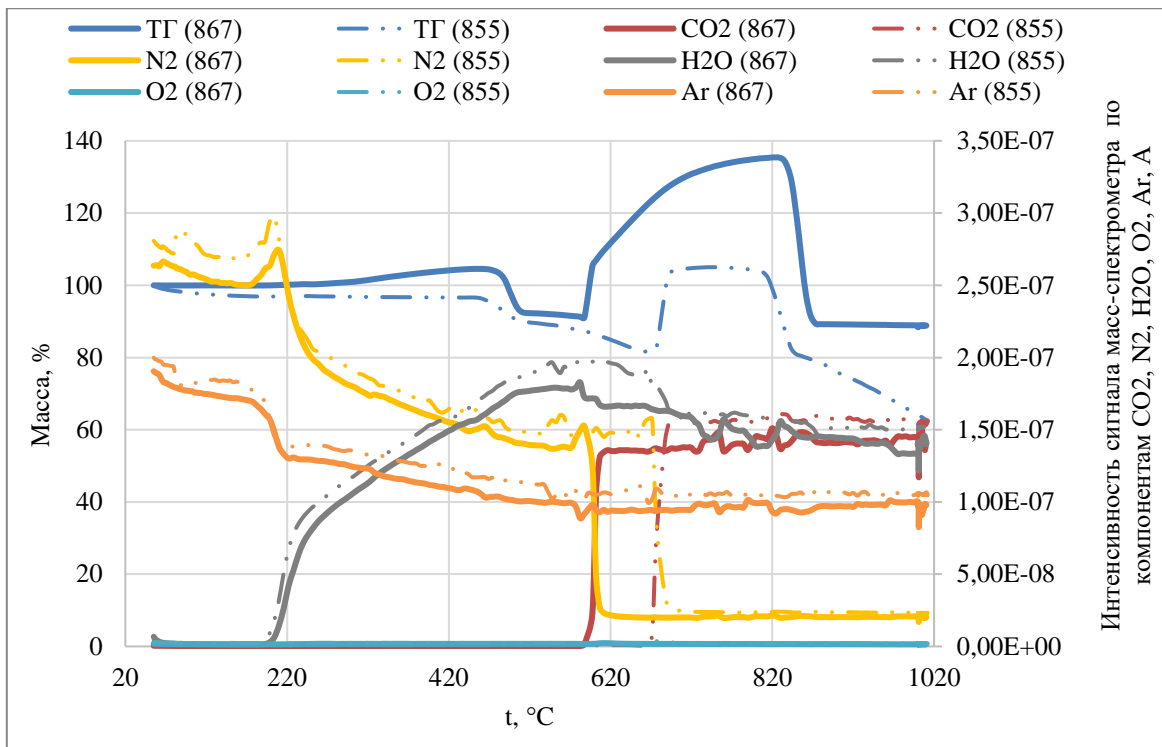


Рис. 2. Данные термического и газового анализа экспериментов №867 и №855

Полученные результаты эксперимента были обработаны (рис. 3) согласно методике, предложенной Университетом Ньюкасл (Австралия) [2].

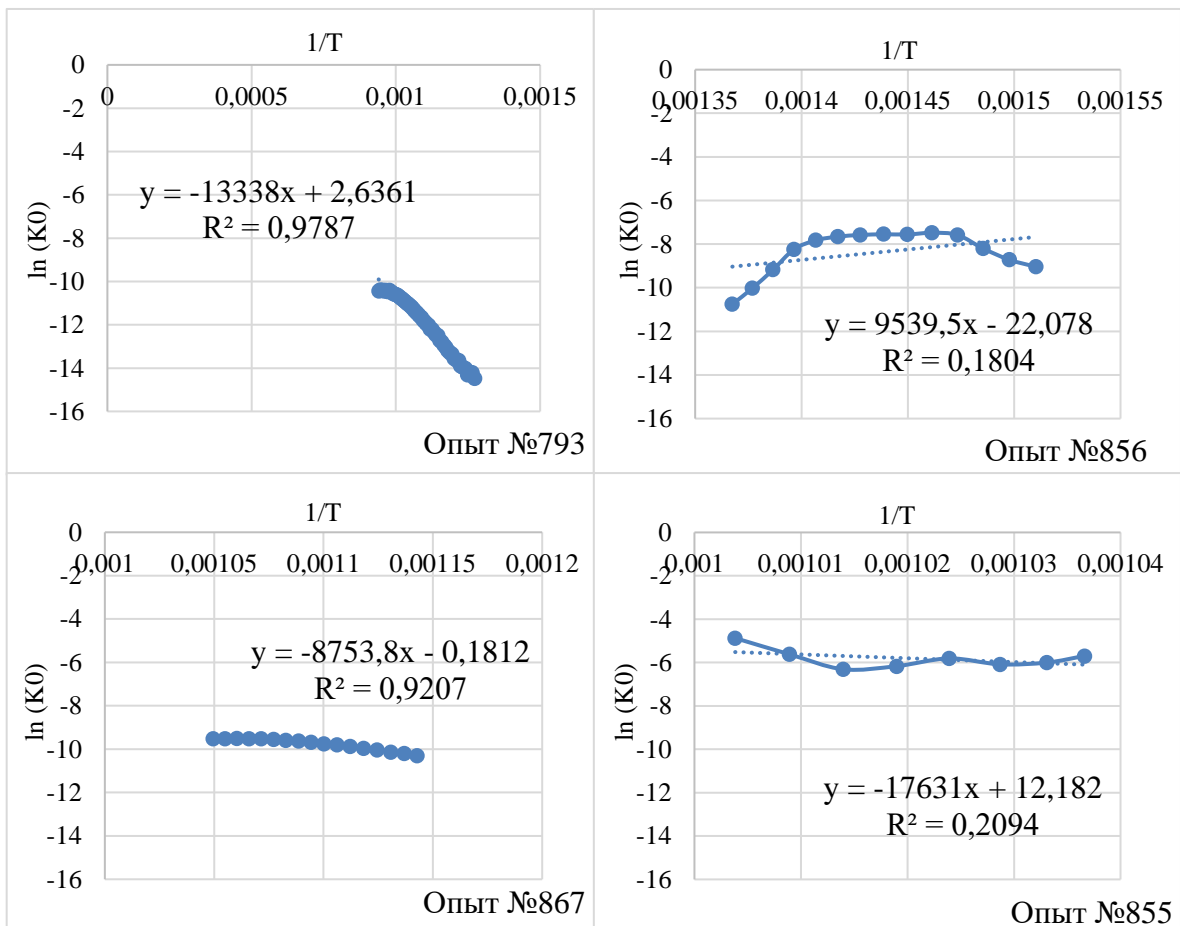


Рис. 3. Результаты обработки экспериментов №793, №856, №867, №855

В результате обработки эксперимента была найдена функция $f(p, \text{CO}_2)$, зависящая от текущей и равновесной концентраций [2]. Для учета различных факторов в расчете добавили соответствующую функцию, приравняв ее к наиболее подходящему значению для нашего случая, а именно: $1/2X$ [2]. Далее по уравнению Аррениуса была рассчитана энергия активации и найден предэкспоненциальный множитель (табл. 2).

Таблица 2

Полученные параметры обработки экспериментов

№ эксперимента	Состав дутья, % об.	Степень конверсии X, %	Предэкспоненциальный множитель A, мин ⁻¹ • кПа ⁻¹	Энергия активации E _a , кДж/моль
793 (СаО)	100% CO ₂	33,86	13,96	110,89
867 (СаО)	50% H ₂ O + 50% N ₂ с переключением при 570°C на 50% H ₂ O + 50% CO ₂	35,40	1,20	72,78
856 (зола)	100% CO ₂	14,24	3,88•10 ⁹	79,31
855 (зола)	50% H ₂ O + 50% N ₂ с переключением при 670°C на 50% H ₂ O + 50% CO ₂	5,01	1,95•10 ⁵	146,58

Рассчитанная по результатам четырех экспериментов степень конверсии составила 5-14 % для летучей золы мусоросжигательного завода и 33-35 % для чистого оксида кальция. Предэкспоненциальный множитель, полученный в экспериментах с золой мусоросжигательного завода, на несколько порядков больше, чем в экспериментах с СаО. Влияние параметров экспериментов на энергию активации неоднозначно. Так, если для СаО введение в состав дутья помимо CO₂ водяных паров приводит к снижению энергии активации, то в случае золы мусоросжигательных заводов наоборот – к ее увеличению.

В результате исследования получены характерные температурные режимы взаимодействия летучей золы в среде пара, азота, аргона и углекислого газа. По итогам обработки экспериментальных данных найдены основные характеристики процесса карбонизации, такие как степень конверсии, энергия активации и предэкспоненциальный множитель. Для получения более ясной картины, в частности по энергии активации, необходимо провести ряд опытов с разной скоростью нагрева образца и различными составами дутья. Полученные данные могут быть использованы для оценки фактической эффективности карбонизации основных компонентов зол ТЭС в ходе минерализации CO₂.

Список использованных источников

1. Recent advances in carbon dioxide utilization / Zhien Zhang [et al.] // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2020. Т. 125. №109799. – Pp. 1-17.
2. Determination of carbonation/calcination reaction kinetics of a limestone sorbent in low CO₂ partial pressures using TGA experiments/ M. Ramezani, P. Tremain, E. Doroodchi, B. Moghtaderi // Energy Procedia. 2017. № 114. – Pp. 259-270.

УДК 669.046.44

А. И. Хакимов, Г. В. Воронов, А. Н. Алексеев

ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет

имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург, Россия

ОСНОВНЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ ПО СОВЕРШЕНСТВОВАНИЮ 32-Х КАМЕРНОЙ ПЕЧИ ОБЖИГА УГЛЕГРАФИТОВОЙ ПРОДУКЦИИ

Аннотация. Печь предназначена для получения углеграфитовой продукции (УПГ) путем обжига заготовок, при котором содержащийся в заготовках связующий материал превращается в кокс, прочно соединяющий частицы сухой шихты. Благодаря этому обожженные заготовки приобретают механическую прочность и электропроводность. В представленной работе произведен анализ работы существующей печи [1].

Ключевые слова: печь обжига, углеграфитовая продукция, инжекционные горелка, электропроводность, дымовые газы.

Abstract. The furnace is designed to produce carbon-graphite products by firing work pieces, in which the binder contained in the work pieces turns into coke, which firmly binds the dry charge particles. Due to this, the fired work pieces acquire mechanical strength and electrical conductivity. The presented work analyzes the operation of the existing furnace.

Key words: roasting furnace, carbon-graphite products, injection burners, electrical conductivity, flue gases.

Обжиг заготовок происходит при температуре 900 ...1100 °С без доступа кислорода воздуха и при условии, при котором обеспечивается отсутствие деформации заготовок и изделий. Для этого обжиг заготовок производится в печи, заполненной специальной защитной пересыпкой. В качестве пересыпки используется мелкий кусковой антрацит.

Печь обжига состоит из 32 камер, которые располагаются в два ряда, соединенные по торцам печи газоходными каналами. Вдоль камер по периметру печи расположен кольцевой газоход.

Каждая камера разделена муфельными стенами. Вертикальные муфельные каналы соединены с под подовым пространством, а через огневые колодцы в межкамерных простенках с под сводовым пространством соседней камеры. На рисунке 1 показана технологическая схема обжига заготовок [2].