

Научная статья  
УДК 662.613.1

## КАРБОНИЗАЦИЯ ЛЕТУЧЕЙ ЗОЛЫ МУСОРОСЖИГАТЕЛЬНОГО ЗАВОДА ДЛЯ СЕКВЕСТРАЦИИ CO<sub>2</sub>

**Екатерина Александровна Ткаченко, Георгий Евгеньевич Масленников<sup>1</sup>,  
Татьяна Феоктистовна Богатова**

Уральский федеральный университет имени первого Президента  
России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

[g26m12@gmail.com](mailto:g26m12@gmail.com)

**Аннотация.** Методом термогравиметрического анализа проведены экспериментальные исследования процесса взаимодействия образца летучей золы с характерными газовыми компонентами уходящих газов ТЭС. Получены данные по температурным режимам и найдены ключевые параметры карбонизации летучей золы.

**Ключевые слова:** карбонизация, летучая зола, термогравиметрия, улавливание и связывание углекислого газа

**Благодарности:** исследование выполнено на установке, приобретенной Уральским федеральным университетом имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия.

**Для цитирования:** Ткаченко. Е. А., Масленников Г. Е., Богатова Т. Ф. Карбонизация летучей золы мусоросжигательного завода для секвестрации CO<sub>2</sub> // Энерго- и ресурсосбережение. Энергообеспечение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии. Атомная энергетика. Даниловские чтения — 2021 = Energy and Resource Saving. Power Supply. Non-traditional and Renewable Energy Sources. Nuclear Energy. Danilov Readings — 2021 : сборник научных трудов. Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2023. С. 615–620.

Original article

## CARBONIZATION OF INCINERATOR FLY ASH FOR CO<sub>2</sub> SEQUESTRATION

**Ekaterina A. Tkachenko, Georgy E. Maslennikov<sup>1</sup>, Tatiana F. Bogatova**

Ural Federal University named after the First President of Russia B. N. Yeltsin,  
Ekaterinburg, Russia

[g26m12@gmail.com](mailto:g26m12@gmail.com)

**Abstract.** The method of thermogravimetric analysis was used to experimentally study the process of interaction of a fly ash sample with typical gas components of exhaust gases from TPPs. Data on temperature conditions were obtained and key parameters of fly ash carbonation were found.

**Keywords:** carbonation, fly ash, thermogravimetry, carbon dioxide capture and binding

**Acknowledgments:** performed on the installation made by the Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia.

**For citation:** Tkachenko. E. A., Maslennikov G. E., Bogatova T. F. (2023). Karbonizatsiya letuchey zoly musoroszhigatel'nogo zavoda dlya sekvestratsii CO<sub>2</sub> [Carbonization of fly ash of an incineration plant for CO<sub>2</sub> sequestration]. *Ehnergo- i resursosberezhenie. Ehnergoobespechenie. Netradicionnye i vozobnovlyaemye istochniki ehnergii. Atomnaya ehnergetika. Danilovskie chteniya — 2021* [Energy and Resource Saving. Power Supply. Non-traditional and Renewable Energy Sources. Nuclear Energy. Danilov Readings — 2021]. Ekaterinburg : Ural University Publishing House, 2023. P. 615–620. (In Russ).

Двуокись углерода (CO<sub>2</sub>) входит в группу парниковых газов, выбросы которых в атмосферу являются одной из основных движущих сил изменения климата. В соответствии с Парижским соглашением по климату для удержания потепления на уровне ниже 1,5 °С необходимо сократить ежегодные выбросы парниковых газов вдвое в течение десятилетия. Даже при таком сокращении выбросов CO<sub>2</sub> для решения глобальных климатических проблем необходима разработка технологий улавливания, хранения и утилизации углерода (Carbon capture, storage and utilization — CCUS).

Стратегия улавливания и связывания углекислого газа (CO<sub>2</sub>) включает ряд технологий, которые потенциально могут секвестрировать миллиарды тонн CO<sub>2</sub> в год. Одной из перспективных технологий является

карбонизация — процесс, в котором  $\text{CO}_2$  химически реагирует с материалами, содержащими Ca и/или Mg, с образованием стабильных карбонатов. В данной статье рассматривается карбонизация летучей золы мусоросжигательного завода.

Экспериментальные исследования процесса карбонизации золы мусоросжигательного завода были проведены с целью изучения взаимодействия летучей золы с различными газами-реагентами ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2$ , Ar). Эксперименты проводились на анализаторе NETZSCH STA 449 F3 методом термогравиметрического анализа (ТГА). Во время разогрева печи весами анализатора фиксировалось изменение массы навески, масс-спектрометром записывался газовый состав образующихся продуктов. Параметры экспериментов приведены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры экспериментов карбонизации летучей золы

№ эксперимента	Масса навески, мг	Состав дутья, % об.	Температурная программа, °С	Скорость нагрева, °С/мин
1	30	90 % $\text{CO}_2$ + 10 % $\text{N}_2$	Нагрев до 750	20
2	30	75 % $\text{CO}_2$ + 25 % ( $\text{N}_2$ +Ar)	Нагрев до 750	20
3	30	23 % $\text{CO}_2$ + 77 % $\text{N}_2$	Нагрев до 750	20

Результаты экспериментов представлены на рис. 1–3. В эксперименте № 1 (рис. 1) процесс карбонизации образца летучей золы проходил в диапазоне 250–460 °С, при дальнейшем нагреве происходил обратный процесс с плавным снижением массы. Незначительное выделение  $\text{O}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$  в процессе эксперимента связано с разложением примесей, содержащихся в исходном образце летучей золы.

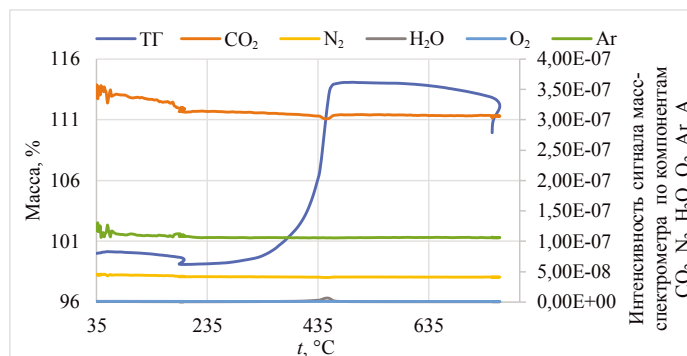


Рис. 1. Данные термического и газового анализа эксперимента № 1

Температурная программа экспериментов № 2 и № 3 была аналогичной, но отличался состав дутья. Процесс карбонизации образцов (рис. 2 и 3) происходил в диапазонах 240–440 и 250–450 °С соответственно.

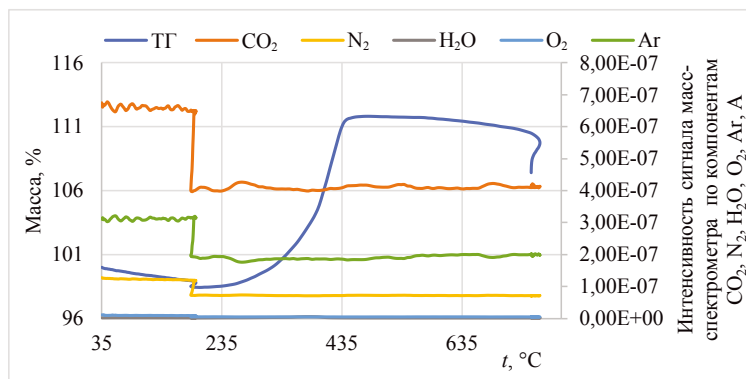


Рис. 2. Данные термического и газового анализа эксперимента № 2

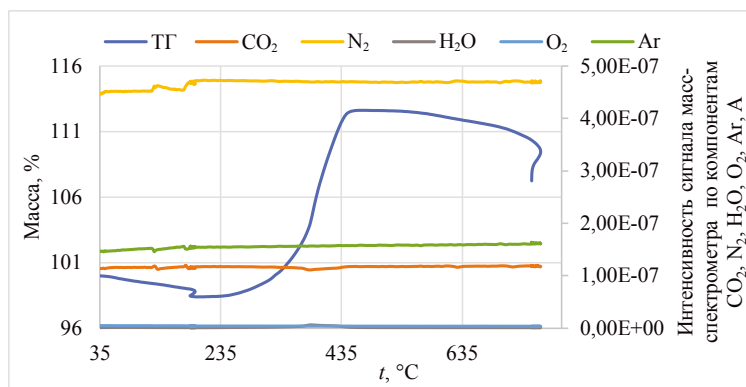


Рис. 3. Данные термического и газового анализа эксперимента № 3

Полученные результаты эксперимента были обработаны (рис. 4) согласно методике, предложенной университетом Ньюкасл (Австралия) [1, р. 262]. Рассчитывалась степень конверсии, которая по трем опытам составила 12–14 %.

При обработке результатов эксперимента нашли функцию  $f(P, CO_2)$  зависимости от текущей и равновесной концентраций [1, р. 264]. Для учета различных факторов в расчет добавили соответствующую функцию, приравняв ее к наиболее подходящему для нашего случая значе-

нию, а именно:  $1/2X$  [1, р. 265]. Далее по уравнению Аррениуса была рассчитана энергия активации и найден предэкспоненциальный множитель (табл. 2). Для сравнения результатов, в таблицу 2 были добавлены значения, полученные при проведении изотермического опыта [1, р. 266] при температурах 400–500 °С.

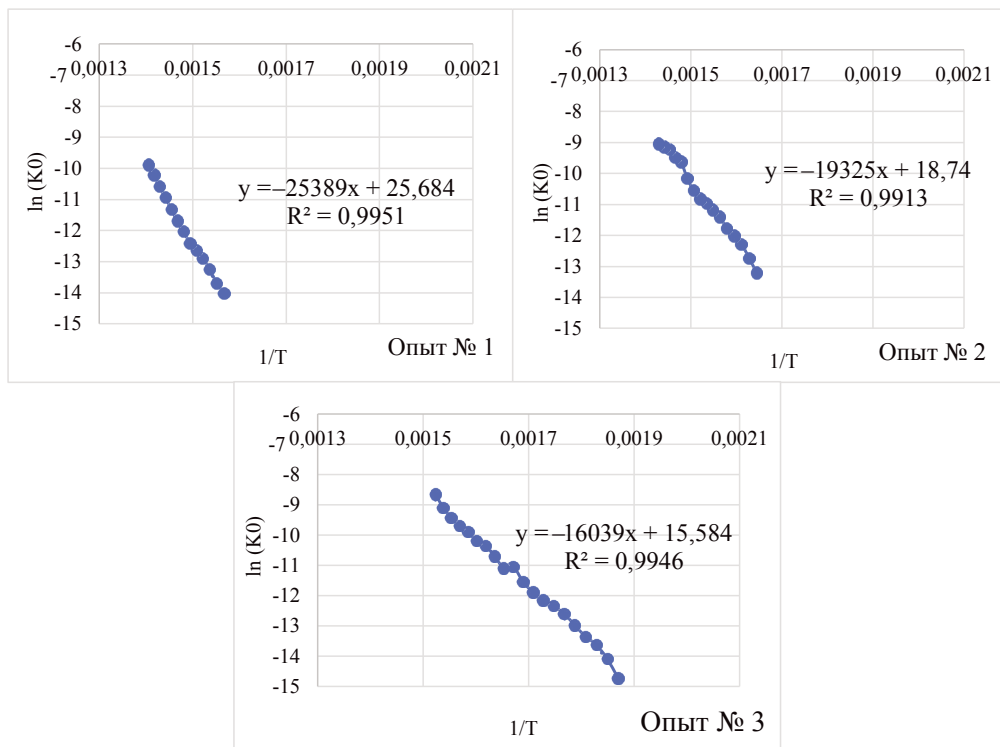


Рис. 4. Результаты обработки экспериментов № 1, № 2, № 3

Таблица 2

Параметры обработки экспериментов карбонизации летучей золы

№ эксперимента	Степень конверсии X, %	Предэкспоненциальный множитель A, $\text{мин}^{-1} \cdot \text{кПа}^{-1}$	Энергия активации $E_a$ , кДж/моль
1	14,09	$1,43 \cdot 10^{11}$	211,08
2	11,81	$1,38 \cdot 10^8$	160,67
3	12,62	$5,86 \cdot 10^6$	133,35
Из статьи	35,00	295,8	19,7

В результате исследования получены характерные температурные режимы взаимодействия летучей золы в среде азота, аргона и углекислого газа. По итогам обработки экспериментальных данных найдены такие параметры, как степень конверсии, энергия активации и предэкспоненциальный множитель. Для получения более точных результатов в дальнейшем необходимо провести ряд изотермических опытов. Данные могут быть использованы для оценки фактической эффективности карбонизации основных компонентов зол ТЭС в ходе минерализации  $\text{CO}_2$ .

### Список источников/References

1. Determination of carbonation/calcination reaction kinetics of a limestone sorbent in low  $\text{CO}_2$  partial pressures using TGA experiments / M. Ramezani, P. Tremain, E. Doroodchi, B. Moghtaderi // Energy Procedia. 2017. Vol. 114. P. 259–270. DOI:10.1016/j.egypro.2017.03.1168.

### Информация об авторах

**Екатерина Александровна Ткаченко** — студент Уральского энергетического института Уральского федерального университета (Екатеринбург, Россия), [07katya007@mail.ru](mailto:07katya007@mail.ru)

**Георгий Евгеньевич Масленников** — аспирант Уральского энергетического института Уральского федерального университета (Екатеринбург, Россия), [g26m12@gmail.com](mailto:g26m12@gmail.com)

**Татьяна Феоктистовна Богатова** — кандидат технических наук, доцент, заведующая кафедрой тепловых электрических станций Уральского энергетического института (Екатеринбург, Россия), [tb-upi@mail.ru](mailto:tb-upi@mail.ru)

### Information about the authors

**Ekaterina A. Tkachenko** — Student of the Ural Power Engineering Institute of the Ural University (Ekaterinburg, Russia), [07katya007@mail.ru](mailto:07katya007@mail.ru)

**Georgy E. Maslennikov** — Postgraduate Student of the Ural Power Engineering Institute of the Ural Federal University (Ekaterinburg, Russia), [g26m12@gmail.com](mailto:g26m12@gmail.com)

**Tatyana F. Bogatova** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Thermal Power Plants of the Ural Power Engineering Institute, Ekaterinburg, Russia), [tb-upi@mail.ru](mailto:tb-upi@mail.ru)