

5. Тупоногов В.Г. Современные теплообменные аппараты [Электронный ресурс]: Трубчатые и пластинчатые теплообменные аппараты / В.Г. Тупоногов. – Электрон. Дан. – УЭИ, УрФУ. – Режим доступа: <https://media.ls.urfu.ru>. – свободный.

6. Теплофизические свойства веществ: учебное пособие / В.Л. Советкин, Л.А. Федяева. – Свердловск: УПИ, 1990. – 140 с.

7. Воинов А.П. Котлы-утилизаторы и энерготехнологические агрегаты / А.П. Воинов, В.А. Зайцев [и др.]. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 272 с.

8. Михеев М.А. Основы теплопередачи / М.А. Михеев, И.М. Михеева. – Изд. 2-е. – М.: Энергия, 1977. – 344 с.

УДК 662.613.1

**А. К. Матюхина, Г. Е. Маслеников, А. Ф. Рыжков**

ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет

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

## **ИССЛЕДОВАНИЕ КАРБОНИЗАЦИИ ЗОЛЫ МУСОРОСЖИГАТЕЛЬНОГО ЗАВОДА**

**Аннотация.** Данная статья посвящена проблеме выбросов  $CO_2$  в атмосферу при производстве тепла и электроэнергии на основе ископаемого топлива. Из методов улавливания, использования и хранения углерода (CCUS) было рассмотрено одно из технологических решений – минерализация  $CO_2$  путем карбонизации материалов с повышенным содержанием основных оксидов, а именно продуктов газоочистки – смеси твердых продуктов реакций, остатков реагентов и мелкофракционной остаточной золы-уноса (ТКО). Методом термogravиметрического анализа (ТГА) на установке NETZSCH STA 449 F3 были проведены экспериментальные исследования процесса взаимодействия продуктов газоочистки и  $CO_2$ . В ходе работы были получены данные изотермических и динамических процессов карбонизации ТКО при разных параметрах (температуре, скорости нагрева, концентрации и др.). Была рассчитана степень конверсии каждого процесса и рассмотрена её зависимость от температуры.

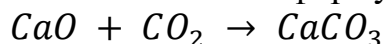
**Ключевые слова:** CCUS, улавливание  $CO_2$ ; зола; карбонизация; термogravиметрический анализ.

**Abstract.** This article is devoted to the problem of  $CO_2$  emissions into the atmosphere during the production of heat and electricity based on fossil fuels. From the carbon capture, use and storage (CCUS) methods, one of the technological solutions was considered -  $CO_2$  mineralization by carbonization of materials with a high content of basic oxides, namely gas cleaning products - a mixture of solid reaction products, reagent residues and fine-grained residual fly ash (MSW). The method of thermogravimetric analysis (TGA) on a NETZSCH STA 449 F3 setup was used to experimentally study the process of interaction between gas cleaning products and  $CO_2$ . In the course of the work, data were obtained on isothermal and dynamic processes of MSW carbonization at different parameters (temperature, heating rate, concentration, etc.). The degree of conversion of each process was calculated and its dependence on temperature was considered.

**Key words:** CCUS, capture  $CO_2$ ; ash; carbonation; thermogravimetric analysis.

Выбросы CO<sub>2</sub> в атмосферу при производстве тепла и электроэнергии на основе ископаемого топлива являются серьезной проблемой во всем мире. Проблемы ужесточения норм выбросов вредных веществ и обязательств по сокращению эмиссии парниковых газов требуют разработки экологически и экономически состоятельных технологий улавливания CO<sub>2</sub> и его последующей утилизации. Стандартным решением данной проблемы является метод, который называется Carbon Capture Utilization and Storage (CCUS) –улавливание, утилизация и хранение углерода. Метод CCUS включает в себя выделение CO<sub>2</sub> из дымовых газов промышленных и энергетических источников, его использование и/или транспортировку к месту хранения и долгосрочной изоляции от атмосферы. Одним из вариантов CCUS является минерализация CO<sub>2</sub> в процессе карбонизации материалов с повышенным содержанием основных оксидов: горные породы, золошлаковые отходы (ЗШО) металлургических, энергетических производств и др.

Реакция карбонизации CaO описывается формулой:



В данной работе были проведены экспериментальные исследования карбонизации продуктов газоочистки московского мусоросжигательного завода (МСЗ) №4 – смеси твердых остатков реагентов и мелкофракционной остаточной золы-уноса. Варьирующий состав этих продуктов представлен в табл. 1 [2].

Таблица 1

Элементный состав (в пересчете на оксиды)  
продуктов газоочистки МСЗ №4, % (по массе).

SiO <sub>2</sub>	TiO	Al <sub>2</sub> O	Fe <sub>2</sub> O	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O	Cl
	2	3	3						5	
2,6- 29,2	0,4- 2,7	0,8- 13,8	0,4- 2,2	20,5- 59,8	0,7- 5,6	2,1- 12,1	1,2- 14,2	1,85- 12,6	0,5- 3,3	4,6- 18,9

Опыты по карбонизации проводились на термогравиметрическом анализаторе (ТГА) NETZSCH STA 449 F3, схема установки которого представлена на рис. 1.

Во время опыта весы анализатора фиксируют изменение массы навески, масс-спектрометр записывает газовый состав образующихся продуктов. Выходным сигналом масс-спектрометра является ионный ток для заданных частиц, характеризующихся отношением массы к заряду m/q. Методика перевода ионных токов и калибровочные коэффициенты изложены в диссертации А.Д. Никитина [3].

В данной работе было проведено шесть изотермических и четыре динамических опыта, параметры которых приведены в табл. 2.

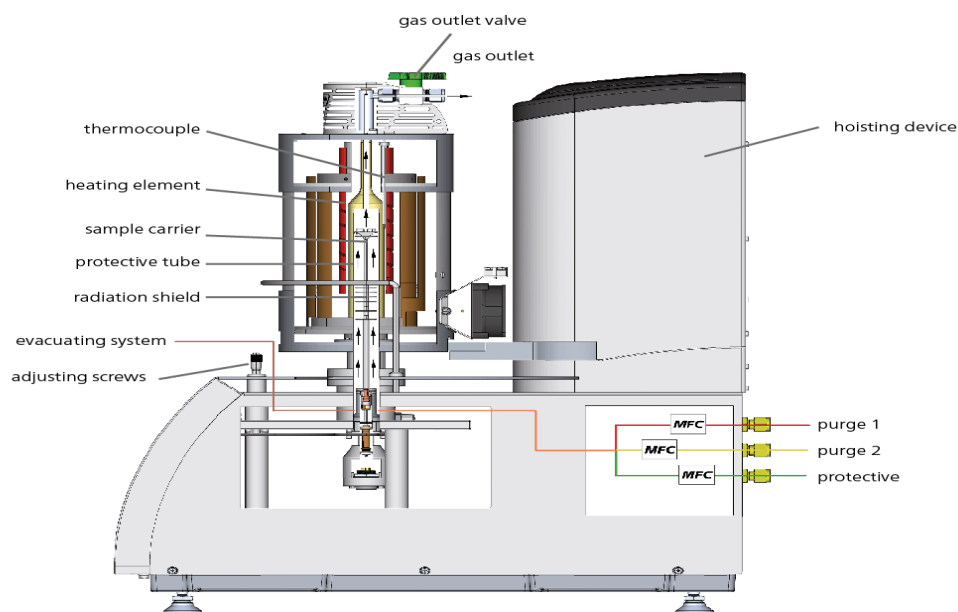


Рис. 1. Схема установки «NETZSCH STA 449 F3»

Таблица 2

Условия экспериментов						
ИЗОТЕРМИЧЕСКИЕ						
№	1	2	3	4	5	6
Температура, °С	350	400	450	500	550	600
Концентрация CO <sub>2</sub> на входе в печь, %	12					
ДИНАМИЧЕСКИЕ						
№	1	2	3	4		
Скорость нагрева, К/мин	10	20	10	10		
Концентрация CO <sub>2</sub> на входе в печь, %	100	100	12	12		
Предварительная осушка	нет	нет	нет	да		

На рис. 2 представлен изотермический опыт при 500 °С, а также концентрация H<sub>2</sub>O и CO<sub>2</sub>. Для организации изотермического режима сначала производится нагрев до заданной температуры в инертной атмосфере – N<sub>2</sub>. При температурах 300-350 °С наблюдается выход воды, связанный с разложением гидроксида кальция, который присутствует в образце, поскольку он является реагентом газоочистки. Уменьшение массы при этом составляет 9-10 %. После нагрева и стадии выравнивания в печь совместно с N<sub>2</sub> подается CO<sub>2</sub> с заданной концентрацией 12 %, соответствующей концентрации CO<sub>2</sub> в дымовых газах от сжигания твердых топлив.

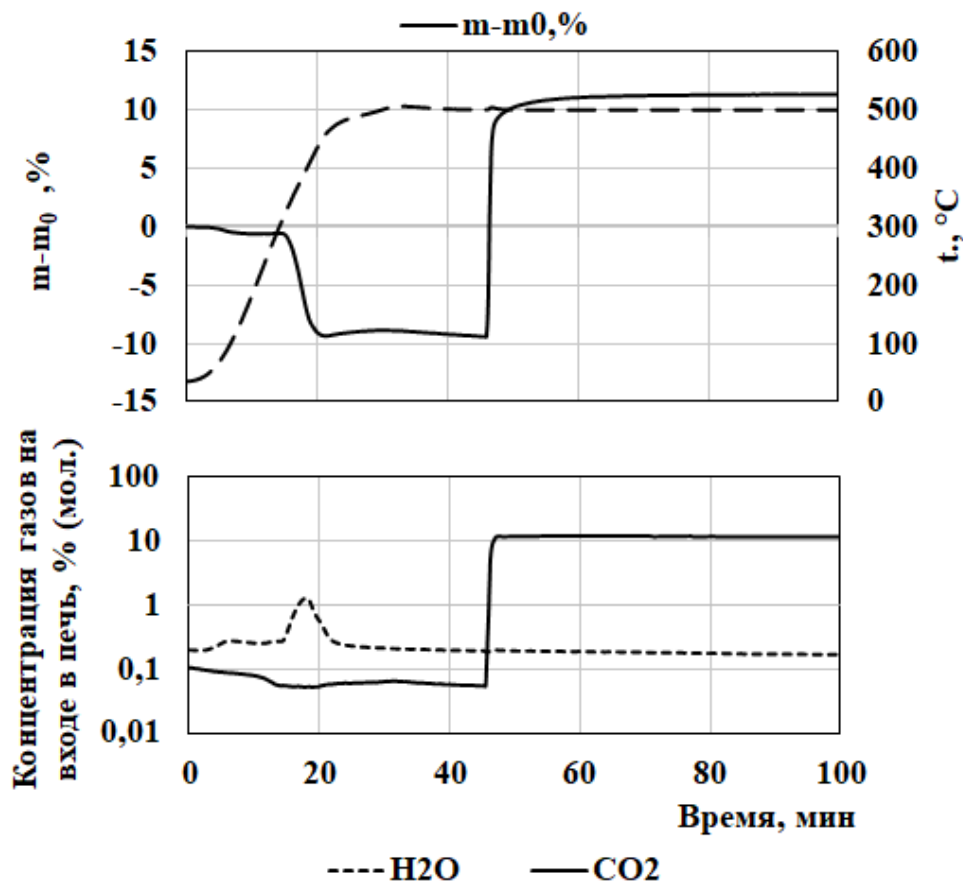


Рис. 2. Изменение массы и концентрации  $\text{H}_2\text{O}$  и  $\text{CO}_2$  в изотермическом опыте при  $500\text{ }^\circ\text{C}$

На рис. 3 представлено изменение массы образца в ходе проведенных изотермических опытов.

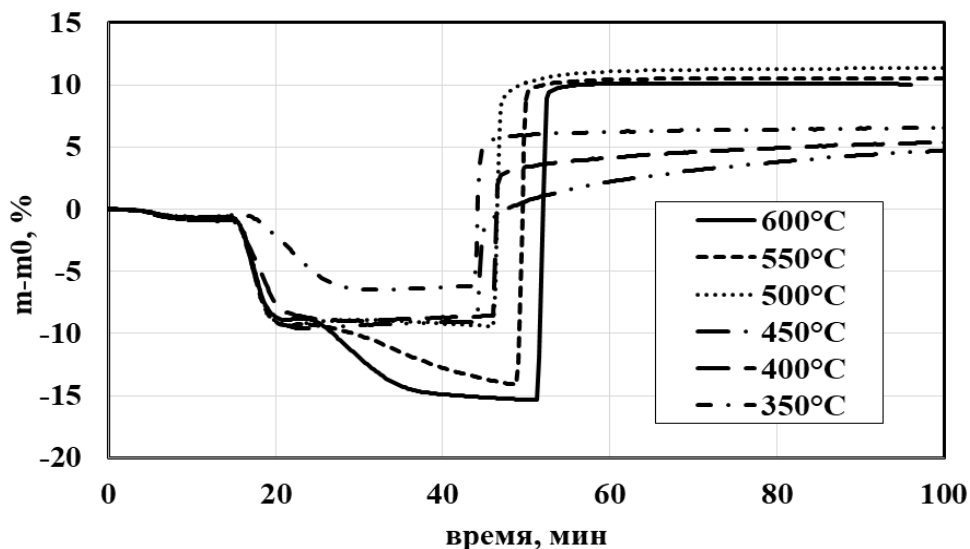


Рис. 3. Изменение массы в течение времени изотермического процесса

При температуре выше  $500\text{ }^\circ\text{C}$  после разложения гидроксида кальция наблюдается дальнейшее падение массы, связанное с разложением карбонатов. При температуре ниже  $400\text{ }^\circ\text{C}$  видно, что разлагается не весь гидроксид кальция.

Расчет степени конверсии выполняется по формуле:

$$X = \frac{m - m_0}{m_0 \cdot m_{\max}}$$

где  $m$  и  $m_0$  – соответственно масса в текущий и начальный моменты времени;  $m_{\max}$  – максимальный возможный прирост массы после карбонизации, принятый 14,3 % по результатам динамических опытов для свежих образцов, для осушенных образцов этот показатель принят 23,8 % с учетом соответствующей потере массы в результате разложения гидроксида кальция.

На рис. 4 представлены температурные профили динамических и изотермических режимов. Точками отмечена максимальная конверсия в изотермических опытах, достигаемая за 1 час основной реакции.

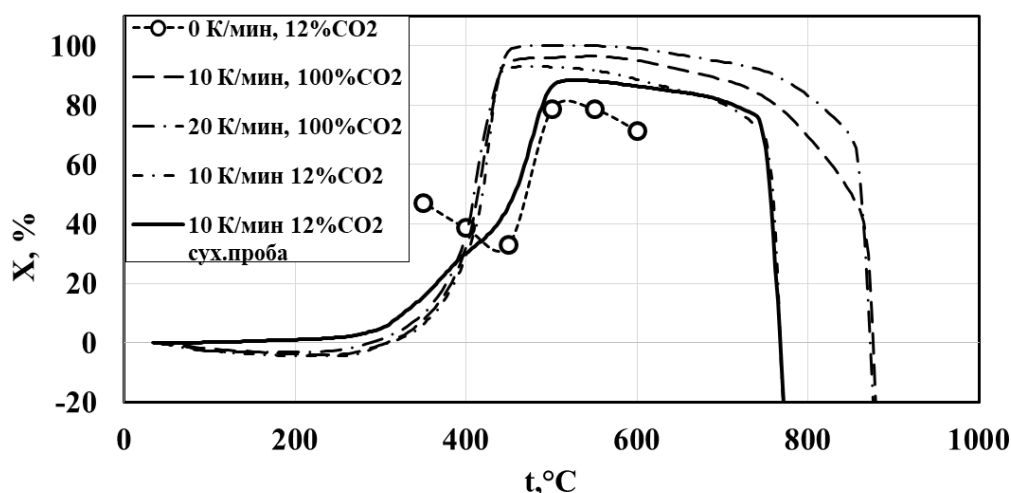


Рис. 4. Зависимость степени конверсии от температуры

В изотермическом сухом режиме максимальная конверсия достигается в диапазоне температур 500-550 °С. Так же существует пик в области температур 300-400 °С, который подтверждает тот факт, что наличие воды в образце в связанном или свободном состоянии ускоряет минерализацию CO<sub>2</sub> [1]. В следующих работах будет проведен поиск оптимальных параметров по температуре и увлажненности потока газов с максимизацией степени конверсии за минимальное время.

### Список использованных источников

1. Applications of fly ash for CO<sub>2</sub> capture, utilization, and storage / A. Dindi, D.V. Quanga, L.F. Vegab, E. Nashefa, M.R.M. Abu-Zahraa // Journal of CO<sub>2</sub> Utilization. 2019. No. 29. – Pp. 82-102.
2. Тугов А.Н. Перспективы энергетической утилизации ТБО // Новости теплоснабжения. 2014. № 6.
3. Никитин А.Д. Влияние водяного пара на физико-химические процессы в парогазовой установке с внутрицикловой газификацией твердого топлива. Диссертация. 2021. – 183 с.