

Научная статья  
УДК 662.613.1

## ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ТЕХНОЛОГИИ КАРБОНИЗАЦИИ ДЛЯ СВЯЗЫВАНИЯ CO<sub>2</sub> ЗОЛОЙ

**Александра Игоревна Кондовина, Юлия Алексеевна Мезенина,  
Татьяна Феокистовна Богатова<sup>1</sup>**

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

<sup>1</sup>[tb-upi@mail.ru](mailto:tb-upi@mail.ru)

**Аннотация.** В статье представлен обзор способов карбонизации летучей золы для связывания CO<sub>2</sub>. Проанализированы основные факторы, определяющие эффективность карбонизации: давление, температура, соотношение твердой и жидкой фаз, различные добавки. Рассмотрено влияние различных параметров на интенсификацию процесса карбонизации, на повышение скорости карбонизации и увеличение её максимальной эффективности.

**Ключевые слова:** карбонизация, летучая зола, связывание CO<sub>2</sub>, эффективность карбонизации

**Для цитирования:** Кондовина А. И., Мезенина Ю. А., Богатова Т. Ф. Интенсификация технологии карбонизации для связывания CO<sub>2</sub> золой // 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. 572–577.

Original article

## INTENSIFICATION OF CARBONIZATION TECHNOLOGY FOR CO<sub>2</sub> SEQUESTRATION BY ASH

**Aleksandra I. Kondovina, Yuliya A. Mezenina, Tatiana F. Bogatova<sup>1</sup>**

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

[tb-upi@mail.ru](mailto:tb-upi@mail.ru)

**Abstract.** The article presents an overview of the ways to carbonation of fly ash for CO<sub>2</sub> sequestration. The main factors determining carbonization efficiency are analyzed: pressure, temperature, ratio of solid and liquid phases, various additives. The influence of various parameters on the intensification of the carbonization process, to increase the rate of carbonization and increasing its maximum efficiency is considered.

**Keywords:** carbonization, fly ash, CO<sub>2</sub> sequestration, carbonization efficiency

**For citation:** Kondovina A. I., Mezenina Y. A., Bogatova T. F. (2023). Intensifikatsiya tekhnologii karbonizatsii dlya svyazyvaniya CO<sub>2</sub> zoloy [Intensification of carbonation technology for CO<sub>2</sub> sequestration by ash] *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. 572–577. (In Russ).

Процессы карбонизации золы можно разделить на два направления: прямая и непрямая (косвенная) карбонизация. Для прямой карбонизации (рис. 1, а) реакция протекает в одном реакторе [1, р. 19]. Это может быть достигнуто путем как газовой, так и водной карбонизации.

Преимуществами прямой карбонизации являются простота процесса и минимальное использование химических реагентов, что делает ее наиболее перспективной технологией улавливания CO<sub>2</sub> летучей золой. Прямая реакция газообразного CO<sub>2</sub> с летучей золой при подходящих температурах и давлениях является основной формой прямой карбонизации. Однако из-за низкой скорости реакции при газотвердой карбонизации обычно требуются повышенные температура и давление, что является очень энергоемким.

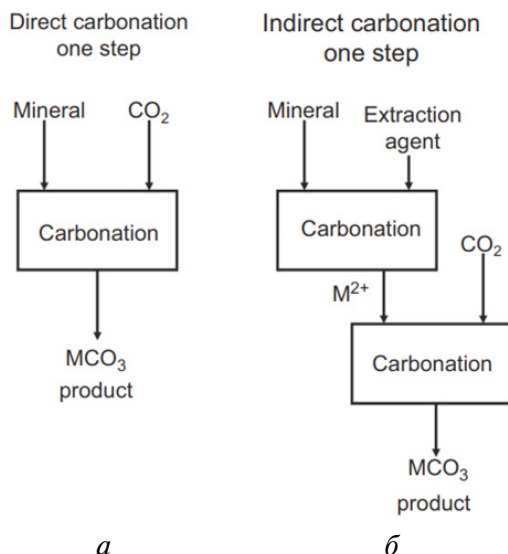


Рис. 1. Принципиальная схема процессов прямой карбонизации (а) и принципиальная схема косвенной карбонизации (б) [1]

Однако даже при повышенной температуре и давлении процесс прямой карбонизации экономически нецелесообразен из-за медленной скорости реакции и низкой способности связывания CO<sub>2</sub>. Более быстрая скорость реакции и более высокая степень связывания CO<sub>2</sub> может быть достигнута при наличии влаги в подаваемом газе CO<sub>2</sub> или путем добавления воды в летучую золу. Это объясняется тем фактом, что влага и вода помогают извлечь ионы кальция или магния из твердой матрицы частиц летучей золы.

Косвенной карбонизацией является процесс, реализуемый более чем в один этап. Процесс (рис. 1, б) инициируется растворением минеральных частиц в водной среде для извлечения щелочноземельных металлов [1, р. 19]. После разделения жидкости и твердого вещества фильтрат, богатый катионами щелочноземельных металлов, карбонизируется CO<sub>2</sub>. Одним из преимуществ непрямого карбонизации является возможность получения ценных чистых карбонатов, поскольку примеси, такие как кремнезем и железо, могут быть удалены до осаждения карбонатов. Наиболее часто используемыми реагентами для процесса выщелачивания являются уксусная кислота (CH<sub>3</sub>COOH), соляная кислота (HCl), серная кислота (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) и соли аммония [2, р. 6481].

Высокое растворение ( $> 80\%$ ) и эффективность карбонизации ( $> 60\%$ ) могут быть достигнуты при умеренной температуре менее  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Однако сложность утилизации выщелачивающих агентов препятствует применению этой технологии в больших масштабах. Кроме того, учитывая, что кальций и магний уже частично присутствуют в виде карбонатов в некоторых летучих золах, выщелачивающие агенты могут вступать в реакцию с этими карбонатами и выделить  $\text{CO}_2$  до того, как они будут карбонизированы.

Скорость и максимальная эффективность карбонизации могут быть улучшены за счет оптимизации параметров процесса.

Размер частиц является ключевым параметром, в значительной степени влияющим как на скорость карбонизации, так и на максимальную эффективность карбонизации. Уменьшение размера частиц может увеличить площадь поверхности частиц, контактирующих с  $\text{CO}_2$ , и значительно повысить извлечение ионов металлов из частиц. Исследования карбонизации природных минералов и стальных шлаков показали, что для достижения приемлемой скорости и эффективности карбонизации материалы должны быть измельчены до размера менее  $100\text{ }\mu\text{m}$  [3, p. 1310], однако это энергозатратный процесс.

Другим фактором является соотношение жидкой и твердой фазы и скорость перемешивания. Для карбонизации суспензии летучей золы было получено оптимальное соотношение Ж/Т  $2\text{--}20\text{ л/кг}$ . Увеличение соотношения Ж/Т улучшило скорость карбонизации за счет увеличения скорости массопереноса, однако оно оказало незначительное влияние на максимальную эффективность карбонизации.

Давление и температура являются еще одним важным фактором карбонизации. Повышенное давление может быть использовано для увеличения как скорости карбонизации, так и ее максимальной эффективности при водной карбонизации. Влияние давления  $\text{CO}_2$  на реакции карбонизации можно объяснить с помощью Закона Генри, согласно которому растворимость молекул  $\text{CO}_2$  в жидкой фазе прямо пропорциональна ее давлению при данной температуре, т.е. более высокое давление  $\text{CO}_2$  способствует диффузии газообразных молекул  $\text{CO}_2$  в суспензию. Концентрация растворенного  $\text{CO}_2$  в жидкой фазе увеличивается, что приводит к большей доступности молекул  $\text{CO}_2$  для захвата и, следовательно, к более быстрой скорости реакции. Кроме того, повышение концентрации  $\text{CO}_2$  при высоком давлении снижает значение рН, что способствует выщелачиванию кальция и магния

из частиц летучей золы и повышению максимальной эффективности карбонизации.

Повышенные температуры приводят к увеличению скорости реакции за счет улучшения скорости массопереноса. Однако частицы летучей золы быстро покрываются образующимся слоем продукта, что в результате приводит к снижению максимальной эффективности карбонизации при повышенных температурах.

В работе 2006 г. было показано, что на эффективность карбонизации золы уноса влияют также различные добавки, например,  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{NaCl}$  и др. [4, p. 161].

Использование золы уноса для улавливания  $\text{CO}_2$  может не только снизить выбросы  $\text{CO}_2$ , но и повысить стабильность летучей золы, тем самым расширяя возможности ее использования в производстве строительных материалов и в других технологиях.

### Список источников/References

1. Long Ji, Hai Yu. Carbon dioxide sequestration by direct mineralization of fly ash // Carbon Dioxide Sequestration in Cementations Construction Materials. Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering, 2018. P. 13–37. DOI: 10.1016/B978-0-08-102444-7.00002-2.

2. Indirect carbonation of Victorian brown coal fly ash for  $\text{CO}_2$  sequestration: multiple-cycle leaching-carbonation and magnesium leaching kinetic modeling / T. Hosseini, C. Selomulya, N. Haque, L. Zhang // Energy & Fuels. 2014. Vol. 28 (10). P. 6481–6493. DOI:10.1021/ef5014314.

3. Accelerated carbonation of different size fractions of bottom ash from RDF incineration / R. Baciocchi, G. Costa, E. Lategano, C. Marini, A. Poletti, R. Pomi, P. Postorino, S. Rocca // Waste Management. 2010. Vol. 30 (7). P. 1310–1317. DOI:10.1016/j.wasman.2009.11.027.

4. Chen Z.-Y., O'Connor W. K., Gerdemann S. J. Chemistry of aqueous mineral carbonation for carbon sequestration and explanation of experimental results // Environmental Progress. 2006. Vol. 25 (2). P. 161–166. DOI:10.1002/ep.10127.

### Информация об авторах

**Александра Игоревна Кондовина** — студент Уральского энергетического института Уральского федерального университета (Екатеринбург, Россия), [sashakondovina@mail.ru](mailto:sashakondovina@mail.ru)

**Юлия Алексеевна Мезенина** — аспирант Уральского энергетического института Уральского федерального университета (Екатеринбург, Россия), [mez.yu99@mail.ru](mailto:mez.yu99@mail.ru)

**Татьяна Феоктистовна Богатова** — кандидат технических наук, заведующий кафедрой «Тепловые электрические станции» Уральского энергетического института (Екатеринбург, Россия), [tb-upi@mail.ru](mailto:tb-upi@mail.ru)

### **Information about the authors**

**Aleksandra I. Kondovina** — Student of the Ural Power Engineering Institute of the Ural University (Ekaterinburg, Russia), [sashakondovina@mail.ru](mailto:sashakondovina@mail.ru)

**Yuliya A. Mezenina** — Postgraduate Student of the Ural Power Engineering Institute of the Ural Federal University (Ekaterinburg, Russia), [mez.yu99@mail.ru](mailto:mez.yu99@mail.ru)

**Tatyana F. Bogatova** — Candidate of Technical Sciences, 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)