

УДК 662.613.1

ПАРАМЕТРЫ И ПОКАЗАТЕЛИ ПРОЦЕССА КАРБОНИЗАЦИИ УГОЛЬНОЙ ЗОЛЫ

Н. А. Симанов¹, Г. Е. Масленников², А. Ф. Рыжков³

^{1,2,3} Уральский федеральный университет имени первого
Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

¹ nikitajui@mail.ru

Аннотация. В настоящей работе приводится сводная таблица параметров проведения экспериментов по прямой карбонизации золы. Также даются следующие показатели: способность к улавливанию, которая представляет собой количество поглощаемого CO₂ на килограмм летучей золы, и эффективность карбонизации. Таблица построена на основе обзора девяти зарубежных работ.

Ключевые слова: CCS, CO₂, карбонизация, летучая зола, секвестрация

PARAMETERS AND INDICES OF THE COAL ASH CARBONIZATION PROCESS

N. A. Simanov¹, G. E. Maslennikov², A. F. Ryzhkov³

^{1,2,3} Ural Federal University named after the First
President of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

¹ nikitajui@mail.ru

Abstract. In this paper, a summary table of the parameters of experiments on direct ash carbonization. The following metrics are also given: the capture capacity, which is the amount of CO₂ consumed per kilogram of fly ash, and the carbonation efficiency. The table is based on a review of 9 sources.

Keywords: CCS, CO₂, carbonation, coal fly ash, sequestration

Комплексный процесс карбонизации основных компонентов зол тепловых электростанций (ТЭС) в процессе минерализации выбросов CO₂ позволяет повышать потребительские свойства золошлаков при снижении эмиссии CO₂ на 3–5 %, что эквивалентно повышению коэффициента полезного действия (КПД) ТЭС на 1,5–2 %. Интен-

сивные научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы (НИОКР, R&D) по новому направлению начинают проводиться в Китае, Индии, Австралии, США и странах ЕС.

В рамках настоящей работы выполнен обзор экспериментальных исследований по прямому методу карбонизации, когда все процессы протекают в одном объеме, также приводятся данные по влиянию параметров процесса на его эффективность.

Химический процесс карбонизации может быть представлен брутто-реакцией основных оксидов с CO_2 с образованием карбонатов [1]:



Такая реакция является экзотермической. Для получения высокой степени карбонизации необходимы высокие давления и концентрации CO_2 при низких температурах. Для достижения высокой эффективности карбонизации (СЕ) необходимо применение низкосиликатного высокодисперсного сырья и высоких температур [2]. Кроме того, можно обнаружить наличие двух максимумов СЕ, приходящихся на полусухую и суспензионную области. Основные показатели и параметры прямой карбонизации приведены в таблице.

Таблица

Показатели и параметры процесса карбонизации угольной золы

Источ-ник	Состав, %	P, бар	T, °C	t, ч	L/S, л/кг	Погл., кг/кг	Пот-ал, кг/кг	СЕ, %
[2]	SiO ₂ —41,8; Fe ₂ O ₃ —9,16; Al ₂ O ₃ —18,39; SO ₃ —3,29; CaO — 6,74; MgO — 2,22; Na ₂ O — 1,38; K ₂ O — 1,13; TiO ₂ —1,03; P ₂ O ₅ —0,41; LOI (потери) — 0,38; следы — 0,38	10	30	1,00	0,00	0,0260	0,074	35,50
		4		22,00	2,00	0,0090		12,10
					5,00	0,0300		40,50
					10,00	0,0320		43,20
					15,00	0,0350		47,20
					20,00	0,0310		41,80
[3]	SiO ₂ —37,93; Fe ₂ O ₃ —4,5; Al ₂ O ₃ —27,88; CaO —15,72; MgO — 1,91; SO ₃ —4,74; CaO _{св} — 4,91; W — 0,1; ρ — 2450 кг/м ³	—	—	24,00	1,60	0,0463	0,118	39,24
				240,00		0,0546		46,27
				579,00		0,0616		52,20
	SiO ₂ —45,75; Fe ₂ O ₃ —3,99; Al ₂ O ₃ —20,05; CaO — 21,6; MgO — 0,78; SO ₃ —2,75; CaO _{св} — 1,10; W — 0,4; ρ — 2290 кг/м ³	—	—	24,00	00,67	0,0105	0,163	6,44
				240,00		0,0158		9,69
				745,00		0,0298		18,28

Продолжение табл.

Источ-ник	Состав, %	P , бар	T , °C	t , ч	L/S , л/кг	Погл., кг/кг	Пог-ал, кг/кг	СЕ, %
[3]	SiO ₂ —41,55; Fe ₂ O ₃ —4,49; Al ₂ O ₃ —4,74; CaO — 29,28; MgO — 4,47; SO ₃ —6,89; CaO _{св} — 7,08; W — 0,3; ρ — 2650 кг/м ³	6–10	25– 37	24,00	0,67	0,0124	0,241	5,15
				240,00		0,0226		9,38
				520,00		0,0315		13,07
[4]	SiO ₂ —51,23; Fe ₂ O ₃ —2,43; Al ₂ O ₃ —26,0; CaO — 9,2; MgO — 2,44; SO ₃ —0,36; Na ₂ O — 0,46; K ₂ O — 0,79	10	30	—	1,00	—	0,103	4,18
					2,00			4,72
					10,00			4,54
			90	—	1,00	—		5,63
					2,00			5,61
					10,00			6,23
[5]	SiO ₂ —41,83; Fe ₂ O ₃ —9,16; Al ₂ O ₃ —18,39; CaO — 6,74; MgO — 2,22; SO ₃ —3,29; Na ₂ O — 1,38; K ₂ O — 1,13	1	80 60 70 80 90	1,50	20,00	—	0,074	33,12
					10,00			33,53
					5,00			30,67
					10,00			34,25
					10,00			33,88
					10,00			33,51
[6]	SiO ₂ —50,3; Fe ₂ O ₃ —7,8; Al ₂ O ₃ —21,8; CaO — 7,2; MgO — 1,5; K ₂ O — 0,3	1	25	—	10,00	—	0,073	4,96
					7,14			5,00
					5,00			3,92
[7]	SiO ₂ —49,3; Fe ₂ O ₃ —7,6; Al ₂ O ₃ —7,5; CaO — 16,3; MgO — 2,6; MnO — 0,1; Na ₂ O — 6,0; K ₂ O — 1,1; TiO ₂ —0,6; P ₂ O ₅ —1,2; TOC — 1,5; Stot — 0,3; Cl — 0,4; W — 0,15	2	25	51,00	10,00	0,0245	0,204	12,00
		17	25	3,50	10,00	0,0470	0,204	23,00
[8]	CaO — 35,2; Fe ₂ O ₃ —3,09; SiO ₂ —11,4; MgO — 7,54; SO ₃ —11,4; Al ₂ O ₃ —3,2; ρ — 1,875 г/см ³	4	40	1,50	0,20	0,0470	0,296	15,90
					0,10	0,0400		13,50
					0,30	0,0450		15,20
					0,40	0,0420		14,20
					0,50	0,0390		13,00
					0,60	0,0380		12,80
					0,70	0,0370		12,50

Окончание табл.

Источ-ник	Состав, %	P, бар	T, °C	t, ч	L/S, л/кг	Погл., кг/кг	Пот-ал, кг/кг	CE, %
[9]	C — 0,018; Si — 0,06; Fe — 0,064; Ti — 0,004; Al — 0,019; Mn — 0,002; Mg — 0,165; Ca — 0,51; Na — 0,024; K — 0,01; P — 0,001; S — 0,123	1	25– 45– 80	030,00	0,03	0,0660	0,400	16,50
					0,06	0,0700		17,50
					0,12	0,0920		23,00
					0,18	0,0840		21,00
					0,24	0,0620		15,50
					0,36	0,0130		3,30
				1120,00	0,03	0,0960		24,00
					0,06	0,1620		40,50
					0,12	0,1850		46,30
					0,18	0,1850		46,30
					0,24	0,1710		42,80
					0,36	0,0530		13,30
[10]	SiO ₂ —32,69; Fe ₂ O ₃ —7,73; Al ₂ O ₃ —10,49; SO ₃ —2,53; CaO — 38,28; MgO — 2,27; Na ₂ O — 1,12; K ₂ O — 0,99; TiO ₂ —0,58; Cl — 1,04; SO ₄ —2,21	2,5	25	0,87	0,00	0,0230	0,289	8,00

Можно сделать вывод, что известные данные носят фрагментарный характер и описывают реализацию частных случаев с разбросом, в конечном результате достигающем 1–2 порядков. Выявление лимитирующей стадии процесса с оптимизацией параметров для приближения фактической эффективности карбонизации золы к теоретической является актуальной задачей.

Список источников

1. Applications of fly ash for CO₂ capture, utilization, and storage / A. Dindi [et al.] // Journal of CO₂ Utilization. 2019. Vol. 29. P. 82–102.
2. Dananjayan R. R. T., Kandasamy P., Andimuthu R. Direct mineral carbonation of coal fly ash for CO₂ sequestration // Journal of Cleaner Production. 2016. Vol. 112. P. 4173–4182.
3. Estimation of CO₂ sequestration potential via mineral carbonation in fly ash from lignite combustion in Poland / A. Uliasz-Bocheńczyk [et al.] // Energy Procedia. 2009. Vol. 1, iss. 1. P. 4873–4879.

4. Comparison of CO₂ capture by ex-situ accelerated carbonation and in in-situ naturally weathered coal fly ash / G. N. Muriithi [et al.] // *Journal of Environmental Management*. 2013. Vol. 127. P. 212–220.
5. CO₂ sequestration by direct mineralisation using fly ash from Chinese Shenfu coal / L. Ji [et al.] // *Fuel Proces. Technol.* 2017. Vol. 156 P. 429–437.
6. Evaluation of factors affecting mineral carbonation of CO₂ using coal fly ash in aqueous solutions under ambient conditions / H. Y. Jo [et al.] // *Chemical Engineering Journal*. 2012. Vol. 183. P. 77–87.
7. Rendek E., Ducom G., Germain P. Carbon dioxide sequestration in municipal solid waste incinerator (MSWI) bottom ash // *Journal of Hazardous Materials*. 2006. Vol. 128, iss. 1. P. 73–79.
8. Ukwattage N. L., Ranjith P. G., Wang S. H. Investigation of the potential of coal combustion fly ash for mineral sequestration of CO₂ by accelerated carbonation // *Energy*. 2013. Vol. 52. P. 230–236.
9. Carbonation of lignite fly ash at ambient T and P in a semi-dry reaction system for CO₂ sequestration / M. Bauer [et al.] // *Applied Geochemistry*. 2011. Vol. 26, iss. 8. P. 1502–1512.
10. Mazzella A., Errico M., Spiga D. CO₂ uptake capacity of coal fly ash: Influence of pressure and temperature on direct gas-solid carbonation // *J. Environ. Chem. Eng.* 2016. Vol. 4, Iss. 4. P. 4120–4128.