

УДК 661.665, 504.3.054

БРАГУЦ П.Д., студент гр. 4БМ51 (ТПУ)
Научный руководитель ПАК А.Я., д.т.н., заведующий ЛПМЭО ИШЭ
(ТПУ)
г. Томск

О РАСХОДЕ ГРАФИТОВЫХ ЭЛЕКТРОДОВ БЕЗВАКУУМНОГО ЭЛЕКТРОДУГОВОГО РЕАКТОРА ПОСТОЯННОГО ТОКА

Введение

В настоящее время промышленность требует генерации значительного количества электроэнергии, что в свою очередь увеличивает потребление носителей и топлива таких как газ, нефть и уголь [1]. Повышение потребления этих природных ресурсов приводит к росту выбросов парниковых газов и загрязнению атмосферы [2]. Значительное влияние оказывают предприятия по обработке металлов, а также промышленные печи по производству карбидов [3].

Для решения данной проблемы используются различные методы улавливания крупных частиц и обратной конверсии газов. Данные решения позволяют значительно снизить выбросы от производств и электростанций [4]. Однако, количество углекислого газа в атмосфере Земли увеличивается с каждым годом, несмотря на внедрение новых возобновляемых источников.

Одним из источников загрязнения окружающей среды является использование печей Аченса для получения карбида кремния [5,6], поскольку в данной технологии, помимо потребления электроэнергии, для обеспечения экранирования реакционной зоны используются древесные опилки, которые создают атмосферу из угарного и углекислого газа, которые предотвращают попадание кислорода в реакционную зону. Однако для поиска подходящих параметров синтеза требуются многократные запуски, и как следствие увеличенный выброс вредных веществ.

Для отработки режимных параметров могут применяться малые имитационные стенды, а в некоторых случаях альтернативные методы синтеза. Перспективными для данных целей являются электродуговые методы синтеза, которые позволяют достигать высоких температур в реакционной зоне за относительно короткий рабочий цикл. В последние годы развивается направление, связанное с повышением энергоэффективности с снижением энергоемкости синтеза материалов, так в качестве перспективного направления рассматривается безвакуумный электродуговой синтез, реализуемый на атмосферном реакторе постоянного тока [7].

В рамках исследования данного процесса ключевое значение имеют воспроизводимость экспериментов и их масштабируемость. Для

обеспечения последующих исследований необходимыми объемами продукта синтеза требуется проведение нескольких серий экспериментов, что, в свою очередь, обуславливает потребность в оценке расхода графитовых компонентов, составляющих реакционную зону. Анализ изменения массы графитовых элементов за один рабочий цикл однофазного дугового реактора позволит осуществлять точное прогнозирование и планирование закупок данных расходных материалов.

Особенностью работы безвакуумного дугового реактора является формирование облака газов CO и CO₂, которые заменяют собой герметичную камеру – реактор, предотвращая окислительные реакции по отношению к продукту синтеза. В этой связи возникает вопрос, насколько целесообразно использовать безвакуумную технологию синтеза материалов с точки зрения вредных вопросов, являющихся частью технологического цикла используемого оборудования.

Таким образом, целью настоящей работы является оценка изменения массы графитовых элементов в электродуговом реакторе постоянного тока за рабочий цикл в общем энергетическом балансе процесса синтеза. В соответствии с проводимыми исследованиями по теме магистерской работы исследование ведется на примере процесса получения силицида бора.

Методы и оборудование

Была подготовлена шихта для получения силицида бора. В качестве источника кремния использовался порошок чистотой 99.9% с размером частиц до 100-250 мкм, источник бора чистотой 99.5% с размером частиц до 5-20 мкм. Помол с целью смешивания компонентов шихты производился в планетарной мельнице Retsch PM100. Для помола использовались стаканы из карбида вольфрама объемом 50 мл и 9 шаров из карбида вольфрама. Длительность помола составила 30 минут при частоте 400 об/мин. Синтез производился в электродуговом реакторе постоянного тока [8] со следующими параметрами тока разрядного контура и продолжительности поддержания дуги: 150 А, , 30 с.; 150 А 45 с.; 150 А 60 с. Загрузка шихты производилась в тигель 20x20 мм с толщиной стенки 3 мм, который помещается в тигель 30x40 мм с толщиной стенки 5 мм. Внутренний тигель выстилается изнутри графитовой бумагой толщиной 0.5 мм и закрывается графитовой крышкой толщиной 3 мм. В качестве анода использовался графитовый стержень диаметром 8 мм, длиной 150 мм. Схема реакционной зоны представлена на рисунке 1.

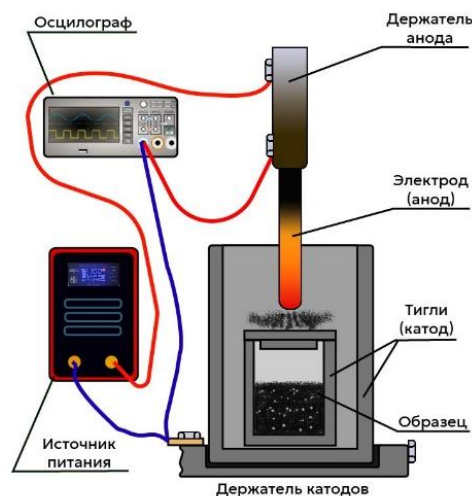


Рис. 1. Упрощенная схема однофазного электродугового реактора постоянного тока

Изменение массы графитовых элементов реактора оценивали путем их взвешивания на аналитических весах «Ньютон ГЛС» до и после проведения эксперимента. Регистрацию электрических параметров и последующий расчет подведенной энергии осуществляли с использованием осциллографа Rigol DS1052E.

Результаты

По результатам измерений выявлено, что наибольшему изменению по массе подвержены внешний графитовый тигель и графитовый электрод – стержень, являющийся анодом, поэтому оценка изменения массы проводилась для данных элементов.

Известно, что при работе дугового реактора в атмосфере воздуха происходит расход графитовых компонентов электродной системы, при этом углерод, взаимодействуя с кислородом воздуха, образует соединение оксида диоксида CO_2 и монооксида углерода CO , что способствует формированию экранирующей газовой среды вокруг реакционной зоны, что препятствует окислению образца в полости тигля [9]. Определено, что при длительности поддержания дугового разряда 30 с, 45 с и 60 с происходит расходуется 0.7 г, 1.15 г и 1.79 г графита соответственно. При этом количество подведенной энергии в этих экспериментов составило 0.054 кВт·ч, 0.079 кВт·ч и 0.117 кВт·ч соответственно. Для помола шихты суммарно для трех экспериментов потребовалось 0.1 кВт·ч.

Примем в среднем из общеизвестных данных, что для производства 1 кВт·ч электроэнергии требуется сжечь не менее 0.2 кг угля. Таким образом серия из трех экспериментов требует 0.35 кВт·ч электроэнергии, что эквивалентно расходу не менее 70 г угля для получения электроэнергии. При этом расход углерода электродов разрядного контура составляет 3.64 г углерода за три эксперимента. Таким образом доля углерода, а соответственно и выбросы оксидов углерода, при расходе электродов при

работе атмосферного дугового реактора безвакуумного типа составляют не более 5 % относительно выбросов, возникающих для обеспечения реактора электроэнергией. Этот результат показывает, что негативное влияние на атмосферу ввиду расхода электродов атмосферного дугового реактора малы в сравнении с общим негативным влиянием на атмосферу угольных электростанций. При этом в данной работе не учтен положительный эффект от экономии электроэнергии, расходуемой на создание вакуума в традиционных электродуговых реакторах.

Выводы

В ходе проведения исследований, была проведена оценка потенциальных затрат электроэнергии. При оценке было выявлено, что использование безвакуумного электродугового реактора имеет незначительное влияние на окружающую среду и энергетические системы, при проведении минимальной серии экспериментов требуется 0.35 кВт*ч электроэнергии и производятся выбросы от сжигания 73.64 г углерода. Подобные затраты при многотоннажном производстве не имеют влияния.

Список литературы:

1. Trends of carbon dioxide (CO₂) emissions from fossil fuels combustion (coal, gas and oil) in the EU member states from 1960 to 2018 / S. Paraschiv, L. S. Paraschiv // *Energy Reports*. – 2020. – V. 6. – P. 237-242
2. Rebound in oil and natural gas emissions amid coal-phase out: Implications for the UK's net-zero strategy / A. Kinyar, K. Bothongo, N. Doytch // *Energy* – 2025. – V. 336. – P. 138506
3. Waste management in the mining industry of metals ores, coal, oil and natural gas - A review / S. Kalisz, K. Kibort, J. Mioduska, M. Lieder, A. Małachowska // *Journal of Environmental Management* – 2022. – V. 304. – P. 114239
4. Recycling lead paste from lead-acid batteries through ammonium bicarbonate derived from carbon dioxide in flue gases: A pilot test in an actual factory / Y. L. Tseng, M. D. Ling, C. S. Yuan, W. H. Cheng // *Environmental Technology & Innovation* – 2025. – V. 40. – P. 104408
5. Cellular responses of human astrocytoma cells to dust from the Acheson process: An in vitro / Y. J. Arnoldussen, T. K. Ervik, B. Berlinger, I. Kero, S. Shaposhnikov, S. Zienolddiny // *NeuroToxicology* – 2018. – V. 65. – P. 241-247
6. In vitro cellular responses to silicon carbide particles manufactured through the Acheson process: Impact of physico-chemical features on pro-inflammatory and pro-oxidative effects / D. Boudard, V. Forest, J. Pourchez, N. Boumahdi, M. Tomatis, B. Fubini, B. Guilhot, M. Cottier, P. Grosseau // *Toxicology in Vitro* – 2014. – V. 28. – P. 856-865
7. Glass waste derived silicon carbide synthesis via direct current

atmospheric arc plasma / A. Ya. Pak, Zh. Bolatova, D. S. Nikitin, A. P. Korchagina, N. A. Kalinina, A. S. Ivashutenko // Waste Management. – 2022. – V. 144. – P. 263-271

8. Способ получения порошка на основе диборида хрома: пат. Рос. Федерация, No 2811920, заявл. 16.06.2023; опубл. 18.01.2024. Бюл. No 2. – 9 с.

9. Vacuumless synthesis of tungsten carbide in a self-shielding atmospheric plasma of DC arc discharge, National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia / A.Ya. Pak, I.I. Shanenkov, G.Y. Mamontov, A.I. Kokorina // International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. – 2020. – V. 93. – P. 105343.

Информация об авторах:

Брагуц Полина Дмитриевна, студент гр. 4БМ51, ТПУ, Россия, 634034, Томская область, г. Томск, ул. Усова, д. 15б, polinabraguc@gmail.com

Пак Александр Яковлевич, д.т.н., заведующий ЛПМЭО ИШЭ ТПУ, Россия, 634521, Томская область, село Кафтанчиково, ул. Цветочная, д. 48, ayapak@tpu.ru