

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Global Warming, Climate Change, and Environmental Pollution: Recipe for a Multifactorial Stress Combination Disaster / S.I. Zandalinas, F.B. Fritschi, R. Mittler // Trends Plant Science. – 2021. – V. 26. – Iss. 6. – P. 588–599.
2. Considering sustainability thresholds for BECCS in IPCC and biodiversity assessments / F. Creutzig, K.H. Erb, H. Haberl, C. Hof, C. Hunsberger, S. Roe // GCB Bioenergy. – 2021. – V. 16. – Iss. 6. – P. 510–515.
3. The estimation of the carbon dioxide emission and driving factors in China based on machine learning methods / J. Qin, N. Gong // Sustainable Production and Consumption. – 2022. – V. 33. – P. 218–229.
4. Global Carbon Budget 2021 / P. Friedlingstein, M.W. Jones, M. O’Sullivan et al. // Earth System Science Data. – 2022. – V. 14. – Iss. 4. – P. 1917–2005.
5. Engine emissions with air pollutants and greenhouse gases and their control technologies / A. Fayyazbakhsh, M.L. Bell, X. Zhu et al. // Journal of Cleaner Production. – 2022. – V. 358.
6. Technologies for carbon dioxide capture: A review applied to energy sectors / S. Vaz Jr., A. Paula R. de Souza, B.E.L. Baeta // Cleaner Engineering and Technology. – 2022. – V. 8.
7. Clustering of economic efficiency of urban energy carbon emissions based on decoupling theory / R. An, G. Zhu // Energy Reports. – 2022. – V. 8. – P. 9569–9575.
8. The analysis of the innovative potential of the energy sector and low-carbon development: A case study for Poland / M. Dzikuć, J. Gorączkowska, A. Piwowar, M. Dzikuć, R. Smoleński, P. Kułyk // Energy Strategy Reviews. – 2021. – V. 38.
9. Carbon Dioxide Emissions, Capture, Storage and Utilization: Review of Materials, Processes and Technologies / T.M. Gür // Progress in Energy and Combustion Science. – 2022. – V. 89.
10. Plasma dynamic synthesis of dispersed metal oxide materials in CO<sub>2</sub> medium / I. Shanenkov, A. Tsimmerman, A. Nassyrbayev, D. Nikitin, R. Tabakaev, A. Sivkov // Ceramics International. – 2023. – V. 49. – P. 34232–34247.

## ПОЛУЧЕНИЕ ПОРОШКА КАРБИДА ХРОМА В ПЛАЗМЕ ДУГОВОГО РАЗРЯДА С ПРИМЕНЕНИЕМ УГЛЕРОДА, ПОЛУЧЕННОГО ПРИ ПЛАЗМЕННОЙ ГАЗИФИКАЦИИ ОТХОДОВ НЕФТЯНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

**П.В. Поваляев<sup>1</sup>, Е.В. Францина<sup>2</sup>, В.В. Егорова<sup>3</sup>**

*<sup>1,2</sup> Томский политехнический университет*

*<sup>1,2,3</sup> Сургутский государственный университет*

*<sup>1</sup>ИШЭ, ОЭЭ, А1-48*

*<sup>2</sup>ИШЭ, Старший научный сотрудник ЛПМЭО*

*<sup>3</sup>ИЕУТН, аспирант кафедры химии*

Научный руководитель: А. Я. Пак, д.т.н., профессор ОЭЭ ИШЭ ТПУ

Все стадии нефтеиспользования, начиная с разведки, добычи и транспортировки нефти, заканчивая ее переработкой и потреблением, приводят к образованию разнообразных маслянистых и вязких остатков, называемых отходами нефтяной промышленности. Отходы нефтяной промышленности можно разделить по количеству содержания углеводородов (40–60 %), воды (30–90 %) и минеральных частиц (5–40 %) [1].

Существует множество традиционных способов утилизации нефтяных отходов, такие как биоразложение, захоронение и сжигание, однако данные методы утилизации имеют ряд недостатков, например, риск загрязнения окружающей среды, низкую производительность и высокую стоимость. Это приводит к появлению новых методов утилизации нефтяных отходов: ультразвуковое облучение, замораживание/оттаивание, пиролиз, ультразвуковое излучение и прочие методы переработки [2]. Одним из таких методов является газификация нефтяных отходов, данный метод обеспечивает снижение объема перерабатываемого сырья,

отделение тяжелых металлов и производство синтез-газа. Такой процесс протекает при относительно высоких температурах – в диапазоне от 700 до 1000 °С. Помимо получения синтез-газа, который используется в качестве топлива для отопления в паровых турбинах и газовых двигателях, в процессе газификации также формируется углеродный остаток, в результате чего возникает необходимость в поиске промышленного применения данного материала.

Известно множество работ по использованию твердого остатка нефти или нефтепродуктов (нефтяного кокса) для получения других уникальных материалов, например карбидов. Нефтяной кокс, в составе которого основным элементом является углерод, является дешевым побочным продуктом при переработке нефти. Результатом использования такого типа сырья в качестве источника углерода стала возможность получения карбидов титана, кремния, бора и др. [3–5].

Преыдушие работы авторов были посвящены пламенной газификации асфальтенов с получением синтез-газа и углеродного материала (УМ), с дальнейшим изучением свойств и морфологии УМ. Помимо этого, был оптимизирован режим работы электродугового стенда для переработки сырья обогащенного асфальтенами [6]. В настоящей работе представлены результаты экспериментального исследования по использованию полученного углеродного материала в качестве источника углерода для синтеза порошка на основе фазы карбида хрома  $Cr_3C_2$ .

Получение углеродного материала осуществлялось с использованием дугового реактора с горизонтальным расположением электродов без использования защитной среды (вакуум или инертный газ). Для получения углеродного материала использовались асфальтены, выделенные из битума ашальчинской нефти, и асфальт, полученный методом сольвентной деасфальтизации (СДА). Описание работы горизонтального электродугового реактора, методика газификации асфальтенов, а также описание параметров углеродного материала представлены в предыдущих работах научной группы [6, 7]. Картины рентгеновской дифракции исходных компонентов: полученного в результате газификации углеродного материала, а также порошка чистого хрома и промышленного углерода представлены на рис. 1.

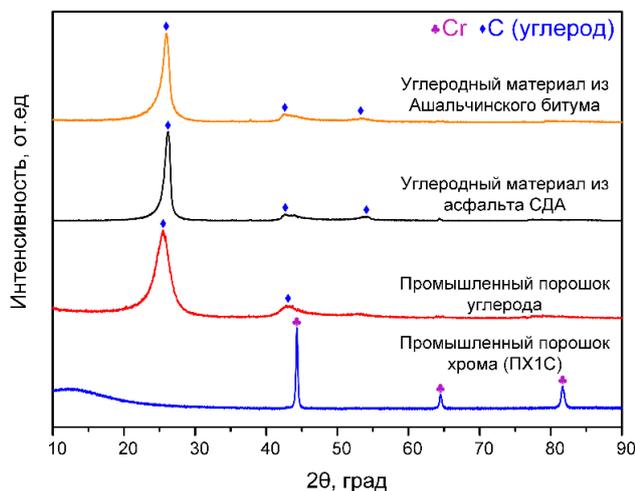


Рис. 1. Картины рентгеновской дифракции исходных компонентов

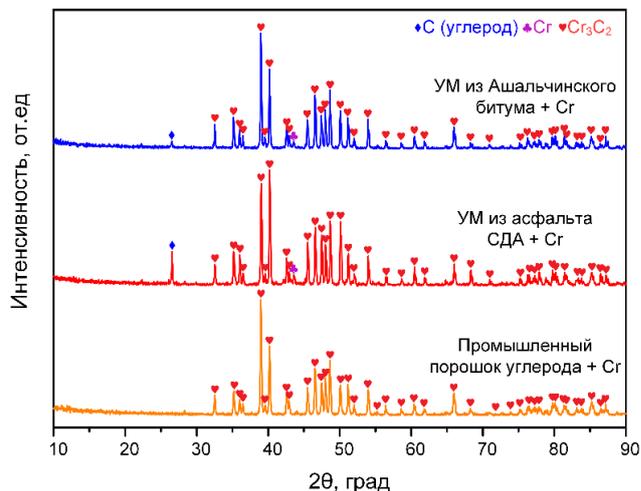


Рис. 2. Картины рентгеновской дифракции порошка карбида хрома, полученного с использованием безвакуумного электродугового реактора

Полученный УМ также, как и промышленный порошок имеет графитоподобную структуру, отличительной особенностью полученного углеродного материала из асфальтенов является меньшая степень кристалличности.

Для проведения исследований по синтезу карбида хрома подготавливались три смеси порошков с разным типом углеродного материала. УМ и порошок хрома (ПХ1С) смешивались в массовом соотношении Cr:C = 3,00:2,45 в вибрационной мельнице Retsch 500 nano в течение 1 часа. После чего данные порошки подвергались воздействию дугового разряда в вертикальном электродуговом реакторе, принципы работы которого представлены в работе [8]. Время дуговой обработки составляло 60 с, сила тока, установленная на источнике постоянного тока, равнялась 200 А.

В полученном порошке карбида хрома из промышленного углерода идентифицированы высокоинтенсивные фазы карбида хрома Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>, что соответствует эталону JCPDS 35-0804 из электронной кристаллографической базы данных PDF4+. Полученные порошки карбида хрома с использованием УМ из асфальтенов, также характеризуются наличием высокоинтенсивных максимумов Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>, однако, в составе продуктов синтеза также идентифицированы максимумы исходных компонентов – углеродного материала и исходного хрома. Наличие данных соединений в составе конечного продукта может быть вызвано неоднородностью исходной смеси и углеродного материала, в частности, а также наличием примесей в составе УМ, что приводит к частичной реакции между исходными компонентами. Для полного завершения реакции между исходными компонентами необходимо проведение дополнительных серий экспериментов, направленных на определение оптимального соотношения исходных компонентов и режима работы дугового реактора при использовании такого типа углеродного материала.

В результате проведенных экспериментальных исследований показана возможность получения порошка на основе карбида хрома Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> с использованием углеродного материала, полученного при плазменной газификации сырья, обогащенного асфальтенами. Полученный материал исследовался методом рентгеновской дифракции: продукты имеют высокоинтенсивные максимумы Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> и малоинтенсивные максимумы исходных компонентов.

*Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 22-13-20016) в Сургутском государственном университете и Томском политехническом университете.*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Jagaba A.H., Kutty S.R.M., Lawal I.M. et al. Diverse sustainable materials for the treatment of petroleum sludge and remediation of contaminated sites: A review // Cleaner Waste Systems. Elsevier. – 2022. – Vol. 2. – P. 100010.
2. Murungi P.I., Sulaimon A.A. Petroleum sludge treatment and disposal techniques: a review // Environmental Science and Pollution Research. Springer. – 2022. – Vol. 29, № 27. – P. 40358–40372.
3. Cui X., Cui L., Wang L., Qi M. Synthesis of titanium carbide powder from TiO<sub>2</sub> and petroleum coke by reactive milling // Petroleum Science and Technology. Taylor & Francis. – 2002. – Vol. 20, № 9–10. – P. 999–1007.
4. Alizadeh A., Taheri-Nassaj E., Ehsani N. Synthesis of boron carbide powder by a carbothermic reduction method // Journal of the European Ceramic Society. Elsevier. – 2004. – Vol. 24, № 10–11. – P. 3227–3234.
5. Narciso-Romero F.J., Rodríguez-Reinoso F., Díez M.A. Influence of the carbon material on the synthesis of silicon carbide // Carbon. Elsevier. – 1999. – Vol. 37, № 11. – P. 1771–1778.
6. Petrova Y.Y., Frantsina E.V., Grin'ko A.A., Pak A.Y., Arkachenkova V.V., Povalyaev P.V. Investigation of the process and products of plasma treatment of asphaltenes // Materials Today Communications. Elsevier. – 2022. – Vol. 33. – P. 104669.
7. Пак А.Я., Поваляев П.В., Францина Е.В., Гринько А.А., Петрова Ю.Ю., Аркаченкова В.В. Получение углеродных графитоподобных наноматериалов при переработке отходов на основе асфальтенов // Bulletin of the Tomsk Polytechnic University Geo Assets Engineering. – 2022. – Vol. 333, № 12. – P. 25–36.
8. Gumovskaya A., Pak A., Yankovsky S., Nassyrbaev A., Nikitin D., Komkina U. Vacuum-free electric arc synthesis of titanium carbide using plant waste-derived carbon // New Journal of Chemistry. Royal Society of Chemistry. – 2023. – Vol. 47, № 38. – P. 17963–17969.