

2. Chen, M., Tao, T., Zhang, L., Gao, W., & Li, C. (2013). Highly conductive and stretchable polymer composites based on graphene/MWCNT network. *Chemical communications*, 49(16), 1612-1614.
3. Кремзер, Р. А. Электрофизические свойства филаментов для 3D-печати в диапазоне частот 115-258 ГГц / Р. А. Кремзер, С. С. Зубцов, А. В. Бадьин // Труды Пятнадцатой Всероссийской конференции студенческих научно-исследовательских инкубаторов, Томск, 17–19 мая 2018 года / Под редакцией В.В. Демина. – Томск: Издательство научно-технической литературы, 2018. – С. 35-39.
4. Kane Yee (1966). «Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media». *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* 14 (3), с. 302–307.

## ПЕРЕРАБОТКА АСФАЛЬТЕНОСОДЕРЖАЩИХ ОТХОДОВ БЕЗВАКУУМНЫМ ЭЛЕКТРОДУГОВЫМ МЕТОДОМ С ПОЛУЧЕНИЕМ УГЛЕРОДНЫХ СТРУКТУР

П.В.ПОВАЛЯЕВ<sup>1,2</sup>, А.Я.ПАК<sup>1</sup>, Е.В.ФРАНЦИНА<sup>1,3</sup>, В.В.АРКАЧЕНКОВА<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Томский политехнический университет, Россия, г. Томск,

<sup>2</sup>Кузбасский государственный технический университет  
имени Т.Ф. Горбачева, Россия, г. Кемерово

<sup>3</sup>Сургутский государственный университет, Россия, г. Сургут

E-mail: [pvp13@tpu.ru](mailto:pvp13@tpu.ru)

Увеличение объемов добычи нефти приводит к образованию большого количества различных видов нефтяных отходов, которые нуждаются в надлежащей утилизации [1]. В состав нефтяных отходов входит множество компонентов, например, самые тяжелые компоненты нефти – асфальтены, неподвергающиеся биологическому разложению. Большое содержание углерода в асфальтенах позволяет рассматривать их как сырье пригодное для получения углеродных материалов. Одним из возможных методов переработки асфальтенов для получения полезных продуктов можно считать метод безвакуумного электродугового синтеза материалов, который также пригоден для переработки различного типа отходов [2].

В настоящей работе описаны результаты по переработке асфальтенов в плазме дугового разряда с целью получения углеродных наноструктур и анализа газовой среды в зоне реакции.

Переработка асфальтенов производилась на атмосферном электродуговом реакторе постоянного тока с рабочим диапазоном тока от 20 до 200 А. Лабораторный реактор имеет горизонтально соосно расположенные электроды. Для обработки сырья плазмой исходный порошок был помещен в графитовый тигель с отверстиями под электроды. Тигель закрывался графитовой крышкой со сквозным отверстием, куда помещался тракт поточного газоанализатора.

По завершению подготовки образцов была произведена серия экспериментов с целью определения оптимального режима работы реактора при переработке асфальтенов, полученных из битума природного происхождения. В ходе серии экспериментов изменялась величина силы тока от 50 до 125 А с шагом в 25 А, время воздействия (30 с) не менялось. Полученные образцы исследованы методом рентгеновской дифракции (рисунок 1а). С использованием поточного газоанализатора получена концентрация газов метана и водорода, выделяющихся в процессе горения плазменной дуги при переработке асфальтенов (рисунок 1б).

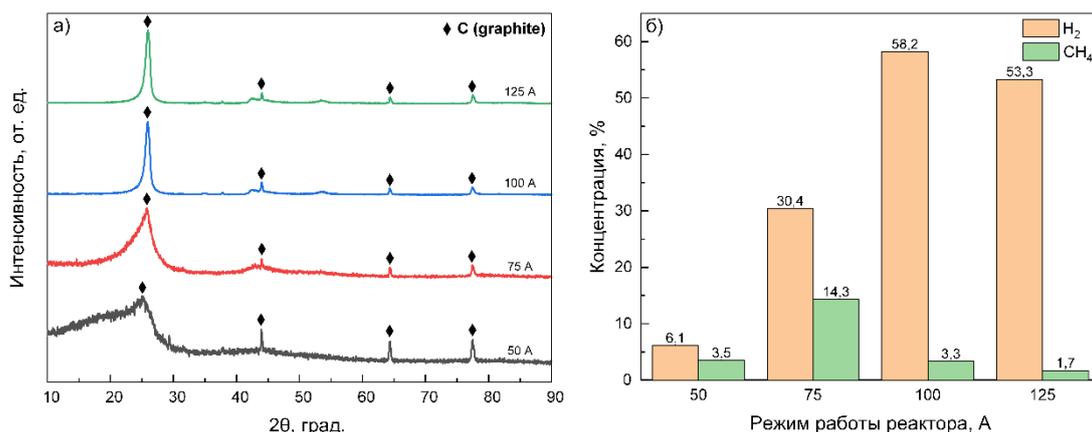


Рисунок 1 – а) Рентгенограммы образцов полученных в режиме с изменением силы тока; б) Процент выделения метана и водорода в зависимости от режима работы реактора

Далее возникла необходимость в определении оптимального режима работы реактора для переработки асфальтенов. Основными параметрами при выборе оптимального режима являлась полная переработка исходного сырья до кристаллической фазы, а также наибольший процент выделившихся в процессе горения газов – метана и водорода. На рентгенограммах, полученных при 100 и 125 А, явно выражена кристаллическая фаза углерода, при этом, стоит отметить, что образцы при режиме 50 и 75 А имеют рентгеноаморфное состояние. Наибольший процент выхода водорода наблюдается при режиме 100 А, при 125 А концентрация водорода снижается. При этом с увеличением режима уменьшается концентрация содержания метана, который разлагается на водород и углерод. Исходя из данных рентгеновской дифракции и данных газоанализа был выбран оптимальный режим работы реактора по переработке асфальтенов – сила тока 100 А и время воздействия 30 с.

С использованием разработанной ранее системы сбора данных были зарегистрированы вольтамперные характеристики (рисунок 2а) и рассчитаны энергетические показатели процесса для оптимального режима работы реактора (рисунок 2б).

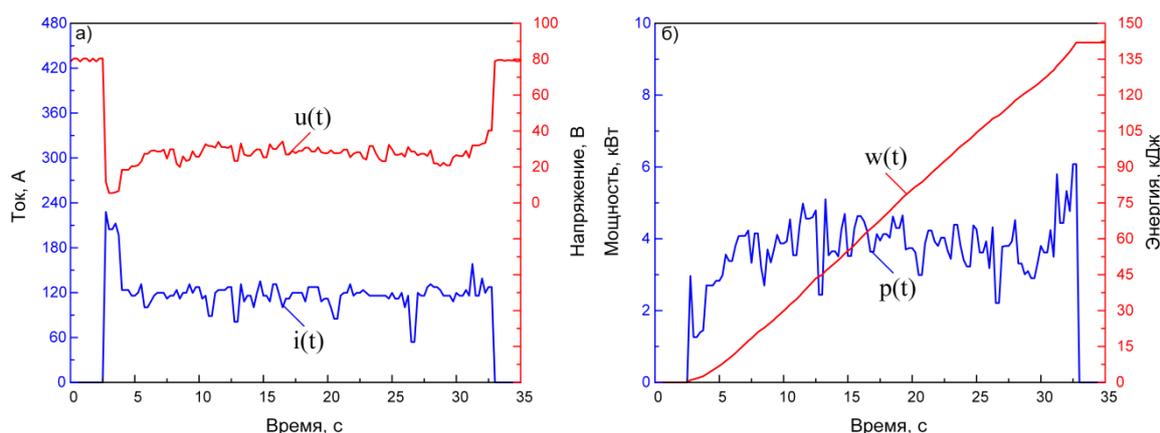


Рисунок 2 – а) Вольтамперные характеристики процесса; б) Энергетические показатели процесса

На осциллограммах можно выделить три основные стадии процесса обработки материала: инициация разряда, процесс горения дуги, в ходе которого происходит переработка асфальтенов, и момент погасания дуги. Суммарная энергия, выделившаяся в процессе горения электродугового разряда, составила  $\approx 141,43$  кДж. Средняя мощность электродугового разряда составила  $\approx 3,75$  кВт в зависимости от силы тока.

После определения оптимального режима работы реактора и расчета энергетических показателей плазменной обработке в оптимальном режиме подвергались асфальтены, выделенные из нефти с различных месторождений. Полученные образцы были также исследованы методом рентгеновской дифракции (рисунок 3), где 1 – асфальтены полученные из битума, 2 и 3 – асфальтены из нефти с различных месторождений.

На полученных рентгенограммах образцов наблюдается явно выраженный пик графита приблизительно на  $26^\circ$ , а также характерные для графитоподобной структуры пики на  $44^\circ$ ,  $54^\circ$  и  $77^\circ$ . Следует отметить также кристаллическую структуру образцов, из чего следует, что выбранный режим работы реактора подходит для других типов асфальтенов, что обеспечивает полную переработку исходного сырья.

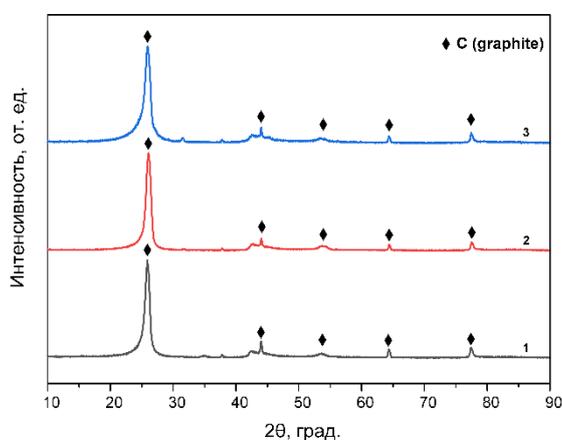


Рисунок 3 – Рентгенограммы: 1 – образец асфальтенов из битума, 2 и 3 – образцы асфальтенов из нефти

Проведение рентгенофазового анализа подтвердило преобладание углерода в составе исходного образца, что позволяет произвести дальнейшие анализы. В частности, полученный материал был исследован методами растровой и просвечивающей электронной микроскопии, в результате чего были выявлены углеродные наноструктуры, такие как: нанотрубки, нанолуковицы и полиэдрический графит.

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-13-20016, <https://rscf.ru/project/22-13-20016/>.*

### Список литературы

1. Asim N., Badiei M., Torkashvand M., Mohammad M., Alghoul M.A., Gasaymeh S.S., Sopian K. Wastes from the petroleum industries as sustainable resource materials in construction sectors: Opportunities, limitations, and directions // Journal of Cleaner Production. Elsevier, 2021. Vol. 284. P. 125459.
2. Pak A.Y., Larionov K.B., Kolobova E.N., Slyusarskiy K. V., Bolatova J., Yankovsky S.A., Stoyanovskii V.O., Vassilyeva Y.Z., Gubin V.E. A novel approach of waste tires rubber utilization via ambient air direct current arc discharge plasma // Fuel Processing Technology. Elsevier, 2022. Vol. 227. P. 107111.