

10. Коновалов Э.Е. Переработка реакторного высокоактивного графита в устойчивые карбидоксидные материалы самораспространяющимся высокотемпературным синтезом / Э.Е. Коновалов, О.В. Старков, М.Л. Мышковский и др. // Атомная энергия. – 1998. – Т.84. – Вып. 3.
11. Патент № 2624270 С1 Российская Федерация, МПК G21F 9/28. Способ переработки отходов реакторного графита: № 2016106423: заявл. 24.02.2016: опубл. 03.07.2017 / Ю.А. Похитонов, М.Ю. Киришин; заявитель Акционерное общество «Радиовый институт имени В.Г. Хлопина». – EDN GADZHZ.
12. Фиксация радионуклидов в облученных блоках реакторного графита / П.А. Платонов, Я.И. Штромбах, О.К. Чугунови др. // Атомная энергия. – 2002. – Т. 92. – №. 6. – С. 445–451.

## УТИЛИЗАЦИЯ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА В ПЛАЗМЕ ДУГОВОГО РАЗРЯДА

**А.Д. Кротик**

*Томский политехнический университет,  
ИШЭ, ОЭЭ, гр. 5АМ23*

Научный руководитель: Ю.Л. Шаненкова, к.т.н., доцент ОЭЭ ИШЭ ТПУ

Углекислый газ ( $\text{CO}_2$ ) – это газ, вырабатываемый как природными, так и искусственными источниками, в виде сжигаемого ископаемого топлива для производства электроэнергии.

Активное потребление ископаемых видов топлива для энергообеспечения производственных процессов способствовало общемировому экономическому росту, но также привело к проблемам загрязнения окружающей среды парниковыми газами – углекислым газом  $\text{CO}_2$ , метаном  $\text{CH}_4$ , закисью азота  $\text{N}_2\text{O}$  и др.  $\text{CO}_2$  является самым распространенным парниковым газом антропогенного происхождения, концентрация которого в атмосфере увеличилась на 47 % с момента индустриальной революции [1–4].  $\text{CO}_2$ , являющийся основным продуктом полного сгорания ископаемого топлива, является парниковым газом, поглощающим тепло из атмосферы и способствующим изменению климата [5].

Основные виды деятельности по выбросам парниковых газов являются:

- производство электроэнергии, на основе ископаемого топлива;
- транспорт;
- сельское хозяйство [6].

В настоящее время в энергетике по-прежнему доминирует выработка электроэнергии из ископаемых источников энергии, таких как уголь, нефть и природный газ, что приводит к высоким показателям выброса углекислого газа. Энергетическая отрасль сталкивается с серьезными проблемами в достижении цели углеродной нейтральности [7]. Основными производителями электроэнергии являются теплоэлектростанции. ТЭС за счет меньших размеров, возможности их расположения позволяют получать относительно дешевую энергию за счет сжигания угля [8]. Ископаемое топливо в совокупности является крупнейшим источником выбросов  $\text{CO}_2$ , на долю которого приходится почти 65 % глобальных выбросов парниковых газов [9].

Углекислый газ можно рассматривать как дешевый и обильный источник мягкого окислителя для производства продуктов с добавленной стоимостью в виде оксидов металлов. При разложении  $\text{CO}_2$  образуются молекулы  $\text{CO}$  и  $\text{O}_2$ , который и будет являться окислителем. Однако разрыв молекул диоксида углерода требует значительного количества энергии. Плазменные технологии позволяют добиться этого, благодаря достижению высоких температур и давления.

Конструктивно система плазмодинамического синтеза состоит из трех основных элементов (рис. 1): а) секционный емкостный накопитель энергии; б) коаксиальный магнитоплаз-

менный ускоритель с металлическими электродами; в) рабочая камера, где происходит плазмохимическая реакция.

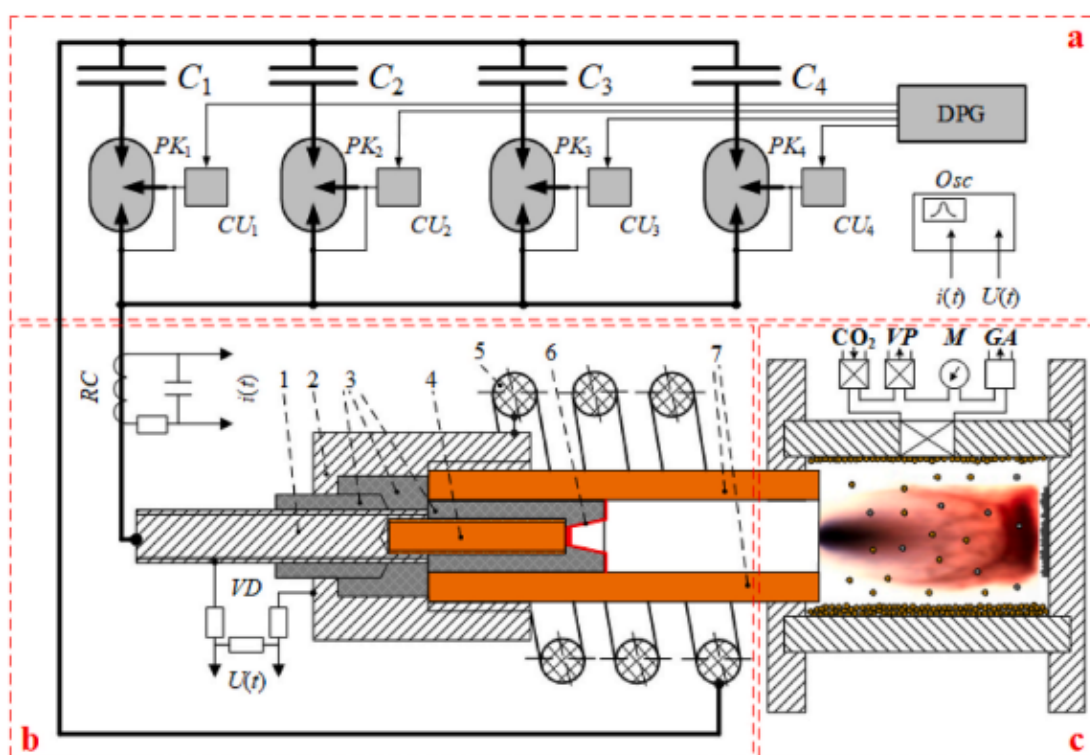


Рис. 1. Эскиз-схема экспериментальной установки:

- 1 – центральный электрод; 2 – металлический держатель;
- 3 – изолятор центрального электрода; 4 – металлическая вставка (медь, сталь, титан или алюминий) центрального электрода;
- 5 – внешняя индуктивная система; 6 – плавкая перемычка;
- 7 – металлический цилиндрический электрод (медь, сталь, титан или алюминий)

Главной особенностью емкостного накопителя энергии является его секционная конструкция, позволяющая варьировать энергетические параметры процесса (максимум напряжения зарядки  $U_{ch} = 5,0$  кВ, максимальная емкость  $C_{ch} = 28,8$  мФ, максимальная запасенная энергия  $W_{ch} = 360$  кДж) и количество последовательных импульсов питания. Энергетические параметры процесса, а именно ток разряда и напряжение на электродах регистрировались катушкой Роговского ( $R_C$ ) и омическим делителем напряжения ( $V_D$ ) соответственно.

Коаксиальный магнитоплазменный ускоритель – это классический ускоритель Z-пинча, размещенный внутри мощной индуктивной системы, которая необходима для выравнивания электроэрозионного износа по длине стержневого электрода и дополнительного ускорения генерируемой плазмы. Дуговой разряд инициируется с помощью токопроводящей перемычки, выполненной в виде слоя графита, нанесенного на внутреннюю поверхность изолятора центрального электрода. Когда цепь питания замкнута, ток нагревательного разряда начинает поступать из емкостного накопителя (С), что приводит к тепловому пробой токопроводящей перемычки. Это приводит к образованию плазменной структуры сильноточного дугового разряда типа Z-пинча с кольцевым плазменным поршнем, который впоследствии ускоряется вдоль внутренней поверхности цилиндрического электрода.

Для плазмохимической реакции пространство рабочей камеры заполняется двуокисью углерода ( $CO_2$ ) при нормальном давлении и комнатной температуре [10].

## 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>2,3</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,