

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ КОНВЕРСИИ ГАЗОВ В ЭЛЕКТРОННО-ПУЧКОВОЙ ПЛАЗМЕ

М.К. Никитин, Т.М. Васильева

АННОТАЦИЯ

В работе описана конструкция лабораторного образца плазмохимического реактора и варианты постановки экспериментов, направленных на оптимизацию конверсии газов в электронно-пучковой плазме. Проведены предварительные эксперименты с целью диагностики и поэлементной отработки установки. Конечными целями оптимизации являются улучшение весогабаритных характеристик реактора, повышение выхода целевых продуктов и минимизация техногенной нагрузки на окружающую среду при его эксплуатации.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

ЭЛЕКТРОННО-ПУЧКОВАЯ ПЛАЗМА, ПЛАЗМОХИМИЧЕСКИЙ РЕАКТОР
ФОРВАКУУМНОГО ДАВЛЕНИЯ, КОНВЕРСИЯ ГАЗОВ, ПАРОГАЗОВАЯ СМЕСЬ

EXPERIMENTAL SETUP FOR RESEARCH OF GASES CONVERSION IN ELECTRON-BEAM PLASMA

M.K. Nikitin, T.M. Vasilieva

ABSTRACT

The paper describes the design of a laboratory sample of plasma-chemical reactor and options for setting up experiments aimed at optimizing the conversion of gases in electron-beam plasma. Preliminary experiments were carried out for diagnostics and element-by-element testing of the unit. The final objective of optimization is to improve the weight and size characteristics of the reactor, to increase the yield of target products and to minimize the technogenic load on the environment during its operation.

KEYWORDS

ELECTRON-BEAM PLASMA, FOREVACUUM PRESSURE PLASMA-CHEMICAL REACTOR,
CONVERSION OF GASES, GAS-VAPOR MIX

ВВЕДЕНИЕ

Окислительная и безокислительная конверсия газов (природного газа, попутного нефтяного газа, углекислого газа и др.) обеспечивают получение широкого спектра экологически чистых видов топлива и других продуктов с добавленной стоимостью, которые могут быть использованы в современном химическом синтезе (водород, этилен, ацетилен) [1]. Особый интерес представляет газожидкостная конверсия (ГЖК), при которой богатое метаном сырье превращается в жидкие синтетические топлива либо путем прямой конверсии (через промежуточную стадию получения метанола), либо в процессе Фишера-Тропша через синтез-газ [2]. Конверсия углекислого газа до монооксида углерода и кислорода также является перспективным направлением для проведения исследований [3].

Широкому внедрению конверсии газов препятствуют необходимость в дорогостоящих катализаторах, большие капитальные затраты на строительство реакторов, высокие технологические и инвестиционные риски. Пучково-плазменные технологии, основанные на плазмохимических превращениях в газах в сильнонеравновесной

электронно-пучковой плазме (ЭПП), позволяют в значительной мере преодолеть упомянутые недостатки известных технологий, а их внедрение, по оценкам, является экономически целесообразным [1], особенно непосредственно на месторождениях. С этой точки зрения исследование процессов конверсии газов в компактных энергоэффективных пучково-плазменных реакторах является крайне актуальным, чему и посвящена данная работа.

Цель данной работы – модернизировать и подготовить существующий лабораторный образец плазмохимического реактора к проведению экспериментов по конверсии газов, а также провести предварительную отработку и тестирование его систем и диагностического комплекса.

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Схема установки показана на рис. 1. Электронный пучок (ЭП) генерируется в высоковакуумной камере электронной пушки (1), инжектируется в реакционную камеру (кварцевую трубку) (2) через выводное окно (3). Трубка расположена внутри рабочей камеры (4), в которой поддерживается пониженное давление. С помощью соплового устройства (5) в реакционную камеру подается чистый газ, газовая смесь или парогазовая смесь. Смешение газов и пара может происходить как в сопловом устройстве, так и непосредственно внутри реакционной камеры. Варианты формирования плазмообразующей среды схематично показаны на рис. 2. При релаксации ЭП в газе возбуждается ЭПП, и ее поток заполняет трубку.

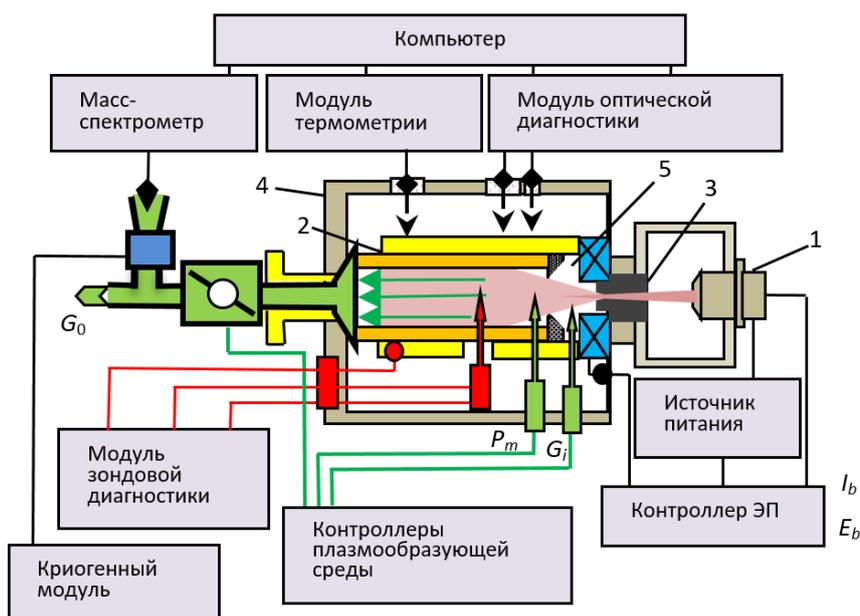


Рис. 1. Схема пучково-плазменного реактора проточного типа.

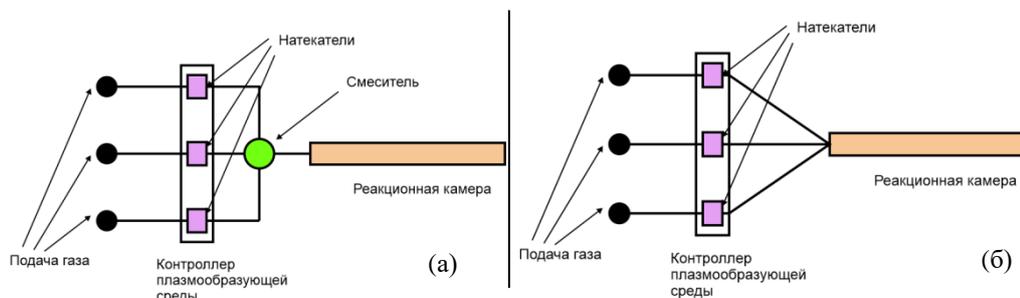


Рис. 2. Схемы формирования плазмообразующей среды: а) со смешением газов вне трубки, б) со смешением газов в реакционной камере

В экспериментах могут независимо варьироваться: ток ЭП (I_b), энергия ускоренных электронов (E_b), компонентный состав плазмообразующей среды, полное давление газа в реакционной камере (P_m) и парциальные давления компонентов (P_i), скорость газового потока (w) вдоль реакционной камеры, которая определяется объемным расходом (G_g) вдуваемого газа и диаметром трубки (d). Контроллер плазмообразующей среды позволяет автоматически поддерживать предустановленное значение P_g с помощью ПИД-регулятора, контролирующего производительность ввода и вакуумной откачки газа из реакционной камеры (G_0). Парциальные давления компонентов P_i регулируются натекателями. Подбирая величины G_i и G_0 ($\sum_{i=1}^n G_i = G_g = G_0$), можно управлять скоростью потока и величиной давления в реакционной камере P_m .

На выхлопной вакуумной магистрали установлен масс-спектрометр (Hiden Analytical), регистрирующий состав продуктов плазмохимических реакций, протекающих в реакционной камере. Газ, поступая в масс-спектрометр, проходит через криогенный модуль, который позволяет устранить излишки паров воды путем циклов нагревания и вымораживания газовой смеси.

Модуль зондовой диагностики предназначен измерения концентрации электронов в плазме и потенциалов в различных зонах реакционной камеры, например, на дне или стенке. Модуль термометрии измеряет температуру плазмы и элементов конструкции реакционной камеры. Температуру нужно знать, поскольку от нее зависят константы скоростей газофазных и гетерогенных реакций. Модуль оптической диагностики включает в себя спектрометры УФ, видимого и ИК диапазонов, соответствующие световоды и коллимационные линзы. Коллимационные линзы собирают излучение с различных зон стенки реакционной камеры и непосредственно из плазмы. Контроллер электронного пучка позволяет регулировать ток ЭП, энергию ускоренных электронов и геометрию ЭП.

Задача исследования ставится следующим образом: подобрать комбинацию E_b , I_b , P_m , G_i таким образом, чтобы длина реакционной камеры была минимальной при максимальном выходе целевых продуктов. Важно отметить, что в оптимизационной задаче есть неявный параметр, а именно температура (T_m), от которой зависят скорости плазмохимических реакций, а также рассеяние и поглощение ЭП (через изменение плотности газа (ρ)) в объеме реакционной камеры, т.е. величина энерговыделения (Q) в ЭПП и его пространственное распределение, в частности – по длине камеры. Модуль оптической диагностики позволяет визуализировать пространственное распределение энерговыделения по объему реакционной камеры.

РЕЗУЛЬТАТЫ ПОЭЛЕМЕНТНОЙ ОТРАБОТКИ УСТАНОВКИ И ЕЕ КОМПЛЕКСНЫЕ ИСПЫТАНИЯ

В рамках данной работы проверена работа всех элементов установки. Испытаны модули зондовой диагностики и термометрии. Протестированы контроллеры ЭП и плазмообразующей среды. Оптический спектр излучения плазмы воздуха показан на рис. 3. Проверена работа криогенного модуля и масс-спектрометра. На рис. 4 показаны масс-спектры воздуха до и после цикла нагревания до 70 и вымораживания до -30 градусов. По полученным данным можно сделать вывод, что парциальное давление паров воды по отношению к давлению смеси уменьшилось на порядок. Масс-спектр неосушенного пропана показан на рис. 5.

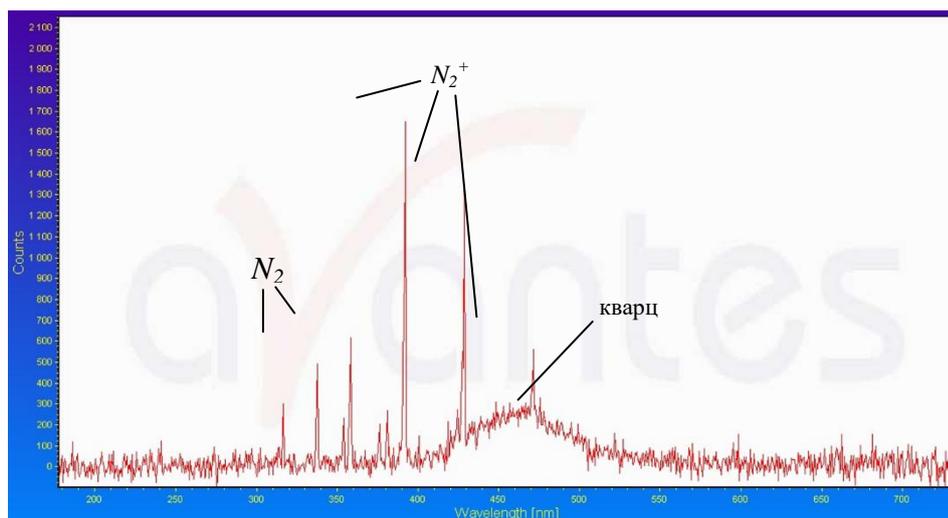


Рис. 3. Оптический спектр плазмы воздуха, возбуждаемой контейнере из кварцевого стекла, при давлении $P_m = 1$ торр.

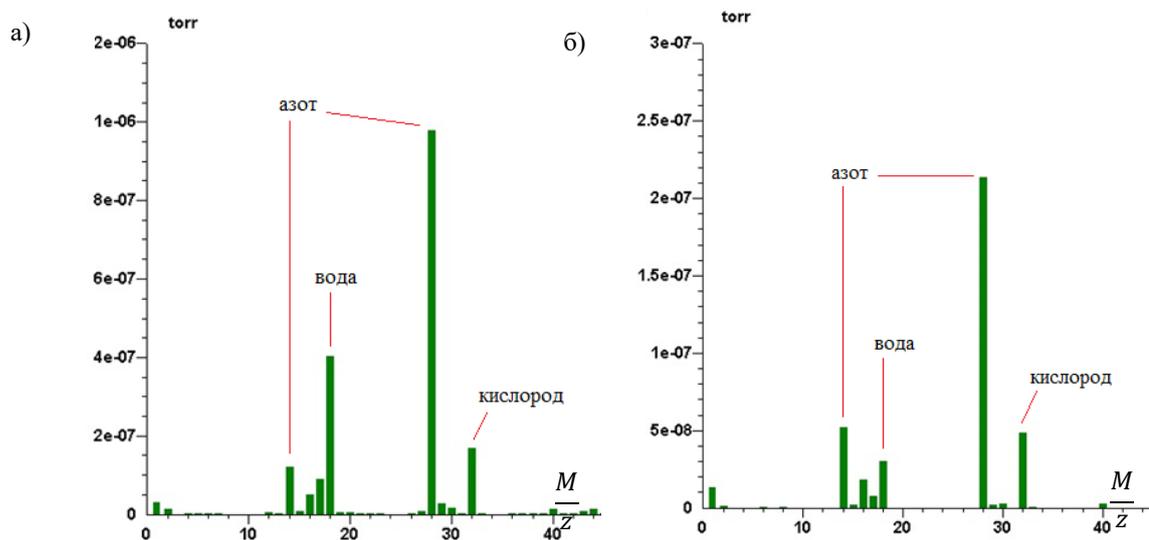


Рис. 4. Отработка криогенного модуля: масс-спектры воздуха до (а) и после (б) одного цикла нагревания и вымораживания.

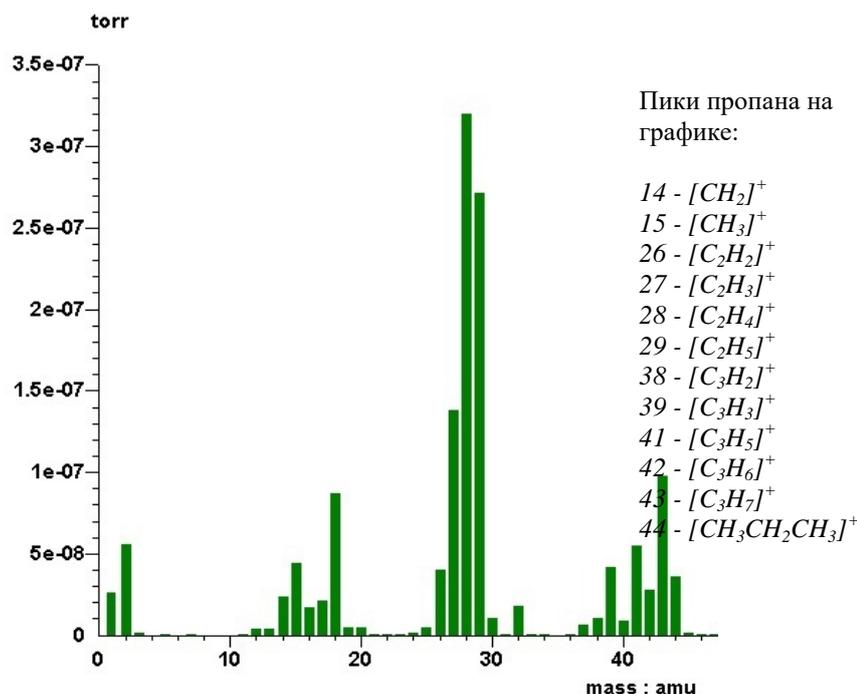


Рис. 5. Обработка масс-спектрометра: спектр неосушенного пропана.

В дальнейшем планируются эксперименты на натуральных плазмообразующих средах, например, с применением смеси метана и паров метанола.

ВЫВОДЫ

На модельных газах проведена серия экспериментов с целью проверки элементов установки. Плазмохимический реактор подготовлен к проведению экспериментов по конверсии газов, предусмотренных программой исследования.

Работа поддержана грантом РФФ № 21-79-30062.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шарафутдинов Р. Г., Константинов В. О., Федосеев В. И., Щукин В. Г. Конверсия природного и попутного нефтяного газов в холодной электронно-пучковой плазме // Прикладная физика, Физика плазмы и плазменные методы, 2017, № 2 С.13-17.
2. Миргаязов И.И., Абдуллин А.И. Современные методы получения синтез Газа и процесс Фишера-Тропша // Вестник Казанского технологического университета, 2014, №9, С. 258-261.
3. Котелев М. С., Гушин П. А., Иванов Е. В., Исаенков Ю. И., Нестеров Е.В., Винокуров В. А. Плазмохимическая конверсия углекислого газа с получением монооксида углерода // Башкирский химический журнал. 2010. №3. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/plazmohimicheskaya-konversiya-uglekislogo-gaza-s-polucheniem-monooksida-ugleroda> (дата обращения: 15.03.2023).
4. Vasilieva, T.M., Bayandina, D.V. An experimental complex for studying the operation of beam-plasma reactors for biomedical applications. // Instrum Exp Tech 53, 2010, С. 288–295.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Никитин Максим Константинович - студент Московского физико-технического института, г. Долгопрудный, Московской обл. / nikitin.mk@phystech.edu;

Татьяна Михайловна Васильева - профессор Объединенного института высоких температур РАН, доктор технических наук, доцент, г. Долгопрудный, Московской обл. / tmvasilieva@gmail.com (ORCID: 0000-0001-6103-6195).