

ПУЧКОВО-ПЛАЗМЕННЫЕ РЕАКТОРЫ ФОРВАКУУМНОГО ДАВЛЕНИЯ С ГЕТЕРОФАЗНЫМ РЕАКЦИОННЫМ ОБЪЕМОМ: ПРОБЛЕМЫ ФОРМИРОВАНИЯ РЕАКЦИОННОГО ОБЪЕМА

FOREVACUUM PRESSURE BEAM-PLASMA REACTORS WITH HETEROPHASIC REACTION VOLUME: PROBLEMS OF THE REACTION ZONE FORMATION

Т.М.Васильева¹ / tmvasilieva@gmail.com (ORCID: 0000-0001-6103-6195),
М.Н.Васильев² / mvasiliev2006@rambler.ru (ORCID: 0000-0002-7586-5573), Дж.М. Тачиа¹ / tachia.m@phystech.edu, У.К.Сингх¹

Т.М. Vasilieva¹, М.Н.Vasiliev², J.M. Tachia¹ U.K. Singh¹

¹ Московский физико-технический институт, г.Москва

² Объединенный институт высоких температур РАН, г.Москва

Создана и полностью испытана экспериментальная установка для генерации электронно-лучевой и гибридной плазмы газов и парогазовых смесей с добавками частиц дисперсных порошков и капель жидкости. Установка является прототипом плазмохимического реактора для «зеленых» технологий на основе холодной неравновесной плазмы.

Ключевые слова: электронно-пучковая плазма, гибридная плазма, плазмохимический реактор форвакуумного давления, «зеленые» технологии

An experimental setup for generating electron-beam and hybrid plasmas of gases and vapor-gas mixtures with particles of dispersed powders and liquid droplets additives has been created and fully tested. The setup is a prototype of a plasma-chemical reactor for "green" technologies based on cold non-equilibrium plasmas.

Keywords: electron-beam plasma, hybrid plasma, forevacuum pressure plasma-chemical reactor, "green" technologies

ВВЕДЕНИЕ

Пучково-плазменные реакторы, в которых реакционный объем формируется электронными пучками, инжектируемыми в достаточно плотную газообразную среду, заняли вполне определенную нишу среди плазмотехнических систем, применяемых для производства материалов, поверхностной обработки изделий, переработки природного органического сырья, очистки и конверсии различных газов [1, 2]. В основе конкурентных преимуществ таких реакторов лежат существенные особенности принципа генерации электронно-пучковой плазмы, а именно:

- Электронный пучок (ЭП) можно инжектировать в газовые и парогазовые смеси практически любого компонентного состава, причем давление плазмообразующей среды (P_m) может варьироваться в широком диапазоне от нижних границ форвакуумного диапазона ($\sim 10^{-3}$ Торр) до атмосферного.
- В форвакуумном диапазоне давлений электронно-пучковая плазма (ЭПП) обладает высокой химической активностью даже при низких, вплоть до комнатных, температурах. Высокие скорости плазменно-стимулированных процессов позволяют существенно сократить время пребывания вещества в реакционном объеме, снизить минимизировать тепловое воздействие ЭП на вещество и тем самым предотвратить термическое повреждение материалов, например термолабильных полимеров.

- Объектами целенаправленного пучково-плазменного воздействия могут быть практически любые вещества во всех агрегатных состояниях: газы, пары, жидкости, макроскопические твердые тела и мелкодисперсные аэрозоли, содержащие частицы порошка или жидкие капельки.
- Инжекция ЭП совместима с действием других ионизаторов, например газовых разрядов различных частотных диапазонов. При этом удается генерировать так называемую гибридную плазму (ГП).

Разнообразие условий генерации ЭПП и ГП, а также конструктивных и технологических особенностей пучково-плазменных реакторов определяет спектр физических и инженерных задач, которые необходимо решать при проектировании таких устройств и оптимизации режимов их работы. Формирование устойчивого и хорошо управляемого реакционного объема является одной из комплексных проблем, от успешности решения которой во многом зависят технико-экономические характеристики оборудования.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В пучково-плазменных реакторах обычно реализуется один из нескольких вариантов реакционного объема, различающихся фазовым составом плазмообразующей среды и схемой организации рабочего процесса. Наибольшие сложности возникают в случаях, когда:

- плазмообразующая среда представляет собой аэрозоль, содержащий жидкую или твердую дисперсную фазу;
- ЭПП контактирует с диэлектриком, например – с поверхностью обрабатываемого вещества (в твердой или жидкой фазе), стенку реакционной камеры или элементов ее внутренней оснастки;
- необходимо обеспечить совместную работу нескольких ионизаторов, например – совместить инжектор ЭП с газоразрядной системой.
- в реакционной зоне требуется сформировать поток ЭПП или ГП.

Один из вариантов лабораторного образца реактора, на котором можно отрабатывать реальные пучково-плазменные технологии, иллюстрируется рис. 1. Остросфокусированный ЭП 1 формируется в высоковакуумной камере 3 электронно-лучевой пушкой (на рисунке не показана) и направляется на вход выводного устройства 2, через которое он инжектируется в цилиндрическую реакционную камеру 7 вдоль ее оси. Выводное устройство конструктивно объединено с соплом 4, формирующим газовый поток 6, частично или полностью заполняющий реакционную камеру. Плазмообразующие газы с заданными расходами G_1 и G_2 подаются в форкамеру сопла, где происходит их смешение.

Противоположный торец реакционной камеры соединен с форвакуумным насосом 12. В вакуумной магистрали установлен ПИД-регулятор производительности откачки G_0 (9). Подбором величин G_1 , G_2 и G_0 можно управлять скоростью потока w и величиной давления в реакционной камере P_m .

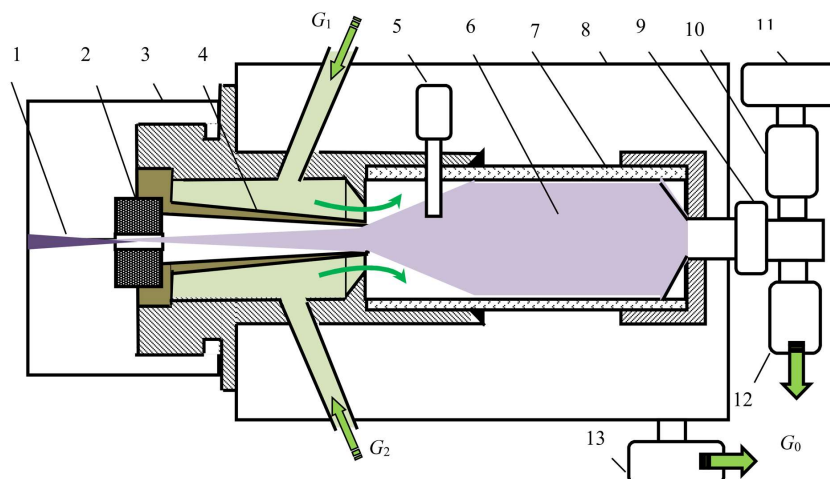


Рис. 1. Схема пучково-плазменного реактора проточного типа с гетерофазным реакционным объемом. Пояснения в тексте.

Газовый поток в реакционной камере ионизируется и возбуждается электронным пучком, т.е. происходит генерация плазмы, свойства которой зависят от параметров инжектируемого ЭП, характеристик плазмообразующей смеси и геометрии реакционной камеры. При необходимости с помощью распыливающего устройства 5 в плазменный поток можно вводить порошок или жидкость. В этом случае поток плазмообразующей среды становится гетерофазным.

Газофазные и гетерофазные плазмохимические реакции приводят к образованию целевых и побочных продуктов, концентрации которых необходимо измерять. Для этого на откачной магистрали установлен масс-спектрометр 11, снабженный холодильником и дроссельным устройством 10.

Если требуется, генерацию плазменного потока можно осуществить и в свободном пространстве. Для этого достаточно убрать реакционную камеру 7, заменив ее рабочей вакуумной камерой большого объема 8. Откачка газа, натекающего в рабочую камеру, осуществляется самостоятельным насосом 13 через ПИД-регулятор. Такой конструктивный вариант реактора оказался наиболее удобным для экспериментов с макроскопическими телами, которые можно размещать и в свободном плазменном потоке, и в практически неподвижном облаке ЭПП. В последнем случае достаточно минимизировать расходы G_1 , G_2 и G_0 . К сожалению, в схемном решении с реакционной камерой большого объема масс-спектропия реакционного объема становится намного более сложной задачей: отбор газообразной пробы надо производить непосредственно из зоны реакции с использованием специальных зондов и специальной системы дифференциальной откачки.

Для генерации ГП снаружи или внутри цилиндрической рабочей камеры 7 устанавливается электродная система (на рисунке не показана), создающая в реакционном объеме дополнительное электромагнитное поле. В наших экспериментах электродная система подключалась к ВЧ-генератору, т.е. ГП представляла собой суперпозицию электронно-пучковой плазмы и плазмы высокочастотного газового разряда емкостного типа. Точно также гибридную плазму можно генерировать и в свободном пространстве (см. выше).

РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 2 и 3 для различных схемных решений пучково-плазменных реакторов представлены варианты формируемого реакционного объема.

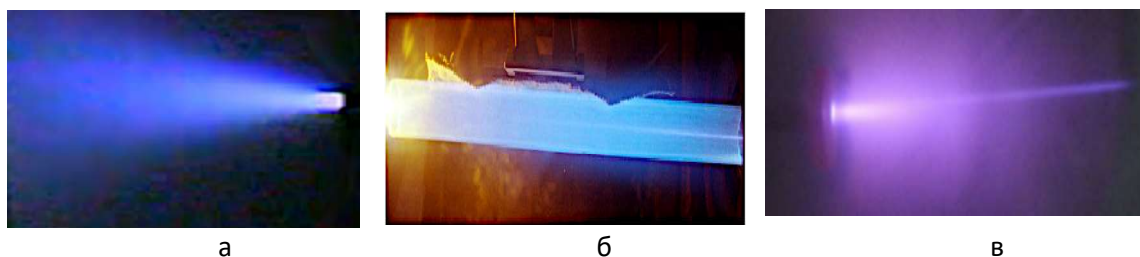


Рис. 2. Неподвижные газофазные реакционные объемы, формируемые инъекцией ЭП: а – в свободном пространстве ($P_m = 5$ Торр, плазмообразующий газ – метан); б – в цилиндрическом контейнере, изготовленном из кварцевого стекла ($P_m = 0,5$ Торр, плазмообразующий газ – кислород, материал контейнера – кварц); в – вблизи поверхности металлического диска ($P_m = 1$ Торр, плазмообразующий газ – азот).

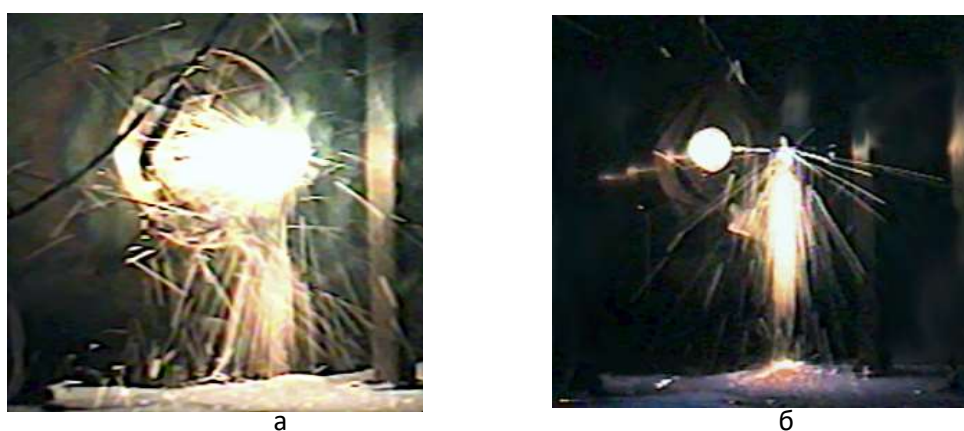


Рис. 3. ЭПП твердого аэрозоля (порошок Al_2O_3 , распыленный в воздухе): а – $P_m = 0,1$ Торр; б – $P_m = 1,0$ Торр.



Рис. 4. Плазменный поток жидкого аэрозоля: а – керосин, распыленный в свободном потоке ЭПП воздуха; б – метиловый спирт, распыленный в ГП метана внутри цилиндрического канала.

ОБСУЖДЕНИЕ

Рассмотрим несколько практических задач, которые были успешно решены на пучково-плазменных установках с гетерофазным рабочим объемом, работающих в форвакуумном диапазоне давлений.

1) Управление динамикой частиц мелкодисперсного аэрозоля в реакционном объеме.

Кулоновское взаимодействие мелкодисперсных частиц в пучково-плазменных системах в условиях глубокого вакуума и при форвакуумных давлениях необходимо учитывать при конструировании и эксплуатации самых различных по назначению устройств, базирующихся на применении ЭПП и ГП. Достаточно детально эти явления изучены применительно к электростатической зарядке космических летательных аппаратов под действием солнечного ветра, а также при работе электроракетных двигателей и бортовых энергоустановок [3, 4]. Для наземных условий электростатическая зарядка частиц микронного и субмикронного размера исследовалась преимущественно в связи с проектированием технологического оборудования, например плазмохимических реакторов различного назначения.

Когда в пучково-плазменном реакторе активной средой являются диспергированные порошки или капельки жидкости, кулоновское взаимодействие этих частиц между собой и с элементами конструкции реакционной камеры порождает сложный комплекс электрофизических процессов и явлений энерго- и массопереноса. Одним из таких явлений является интенсивный вынос частиц конденсированной дисперсной фазы на периферию реакционного объема (см. рисунок 3а), что может нарушить функционирование плазмохимического реактора. Этот эффект наблюдается при достаточно низких давлениях в реакционной камере ($P_m < 0,1$ Торр), а повышение давления до нескольких Торр способно подавить электростатический разлет частиц дисперсной фазы (см. рисунок 3б). Важно, что по мере повышения P_m переход от неустойчивого режима работы реактора к устойчивому происходит плавно, причем границы переходного диапазона давления зависят от химического состава плазмообразующего газа и конструктивных особенностей реакционной камеры.

Возможны и неоднократно наблюдались в экспериментах противоположные эффекты, например, самоорганизация плазменно-пылевых структур в гибридной плазме [5]. Влияние инъекции ЭП в плазменно-пылевую структуру является самостоятельной задачей исследования, непосредственно связанной с проблемой управления гетерофазным плазменным объемом, в котором конденсированная дисперсная фаза распределена упорядоченным образом. Такая задача решалась применительно к реактору гибридного типа с гетерофазной плазмообразующей средой в виде стабильных плазменно-пылевых структур, левитирующих над поверхностью уединенного плоского ВЧ-электрода. Процедура создания упорядоченных плазменно-пылевых структур состоит в следующем. Материал, из которого в дальнейшем будет формироваться плазменно-пылевая структура (например – сублимирующий), испарялся импульсом ЭП. Активированный пучком пар постепенно конденсировался в виде мелкодисперсных кластеров, которые улавливались электромагнитным полем ВЧ-электрода. По окончании процесса конденсации пара над поверхностью электрода формировалась устойчивая пылевая структура, которой можно управлять посредством пространственного сканирования ЭП в зоне ВЧ разряда или импульсно-периодическим воздействием пучка. Характерный диапазон давления в реакционном объеме, когда такие способы управления эффективны – 0,5-2,0 Торр.

2) Формирование газожидкостных потоков ЭПП и ГП.

В форвакуумном диапазоне давлений скоростной напор плазменного потока достаточен для пневматического распыливания жидкости, инжектируемой в него в виде струйки или тонкой пелены. Распыливание возможно и свободной струе возбужденного электронным пучком газа (см. рисунок 4а), и внутри канала, в котором формируется плазменный поток. В последнем случае удается получить поток ГП различных газов, содержащей пары и капли жидкости. Для этого снаружи и внутри цилиндрической реакционной камеры устанавливаются активные и пассивные элементы специальной электродной системы; на активные электроды этой системы подается ВЧ-мощность. В качестве примера на рисунке 4б приведена фотография газожидкостного потока ГП, компонентами которой являются метан (газ-носитель) и частично испаренный метиловый спирт. Характерные условия экспериментов этой серии: $P_m \approx 5$ Торр, $w \approx 10$ м/с.

Форвакуумные пучково-плазменные реакторы гибридного типа с газожидкостным реакционным объемом в настоящее время проходят испытания с целью выявления возможностей их использования в перспективных «зеленых» технологиях, основанных на плазменно-стимулированной конверсии углеводородов, газожидкостной конверсии (GTL-процессах) в плазменных струях, риформинга возобновляемого органического сырья и природных биополимеров.

ВЫВОДЫ

- Создана и прошла полный цикл поэлементных и комплексных испытаний экспериментальная установка для генерации электронно-лучевой и гибридной плазмы газов и парогазовых смесей с добавками частиц дисперсных порошков и капель жидкости. Установка поддерживает непрерывную и импульсно-периодическую генерацию холодной химически активной плазмы в форвакуумном диапазоне давлений плазмообразующей среды.
- На созданной установке проведены физические эксперименты с целью выявления механизмов потери устойчивости реакционным объемом и разработки способов подавления этих неустойчивостей.
- Установка является прототипом плазмохимического реактора для «зеленых» технологий на основе холодной неравновесной плазмы.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа поддержана грантом РФФИ 20-02-00501_а.

ЛИТЕРАТУРА

1. M. Vasiliev Applications of Electron-Beam Plasmas in Plasmachemistry. Encyclopedia of Low-Temperature Plasma. Chief Editor V. Fortov. // Moscow, Nauka, 2001, V. XI, 436-445.
2. M. Vasiliev, T. Vasilieva Beam plasmas: materials production. In: Encyclopedia of Plasma Technology. Ed. by J. Leon Shohet // Taylor & Francis Inc., USA, 2016, 152-166.
3. Mitigating In-space Charging Effects – A Guideline, NASA Technical Handbook. No. NASA-HDBK-4002A w/CHANGE 1 // National Aeronautics and Space Administration, Washington, 2017, 183 pages.
4. А.А. Коротеев, Н.В. Бондарева, Ю.А. Нагель, Н.И. Филатов, И.В. Байденко Закономерности взаимодействия капель сверхвысоковакуумных теплоносителей с поверхностями ловителей бескаркасных систем теплоотвода в космосе // Теплофизика и аэромеханика, 2016, 23 (N 6), 915-922.
5. Процессы самоорганизации в ультрахолодной пылевой плазме // https://mipt.ru/science/labs/active_matter_phys_lab/projects.php.