

# **УПРАВЛЕНИЕ НЕСТАЦИОНАРНЫМИ ПРОЦЕССАМИ В РЕАКЦИОННОМ ОБЪЕМЕ ПУЧКОВО-ПЛАЗМЕННЫХ РЕАКТОРОВ ФОРВАКУУМНОГО ДАВЛЕНИЯ**

Ч.В. Дык, М.К. Никитин, М.Н. Васильев, Т.М. Васильева

## **АННОТАЦИЯ**

Исследовано влияние изменения давления плазмообразующей среды на распределение энергосвечения в реакционной камере для одной из наиболее часто используемых конструкций пучково-плазменного реактора, работающего в форвакуумном диапазоне давления. Для этого при плавно изменяющемся давлении газа в нескольких поперечных сечениях цилиндрической реакционной камеры, заполненной низкотемпературной плазмой воздуха или аргона, измерялась интенсивность излучения его стенки. Плазма генерировалась инжекцией непрерывного электронного пучка вдоль камеры, изготовленной из кварцевого стекла. Для режимов работы реактора с импульсно-периодической инжекцией электронного пучка получены экспериментальные данные о времени высвечивания распадающейся плазмы в зависимости от давления плазмообразующего газа (аргона) и установлены характерные времена различных фаз распада.

## **КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА**

НИЗКОТЕМПЕРАТУРНАЯ НЕРАВНОВЕСНАЯ ПЛАЗМА, ПЛАЗМОХИМИЧЕСКИЙ РЕАКТОР ФОРМВАКУУМНОГО ДАВЛЕНИЯ, НЕСТАЦИОНАРНЫЕ ПРОЦЕССЫ

## **CONTROL OF NON-STATIONARY PROCESSES IN A REACTION VOLUME OF BEAM-PLASMA REACTORS OF FOREVACUUM PRESSURE**

T.V. Duc, M.K. Nikitin, M.N. Vasiliev, T.M. Vasilieva

## **ABSTRACT**

The effect of the plasma-forming medium pressure changing on the distribution of energy release in the reaction chamber is studied for one of the most commonly used designs of a beam-plasma reactor operating in the fore-vacuum pressure range. To do this, at a smoothly varying gas pressure in several cross sections of a cylindrical reaction chamber filled with low-temperature plasma of air or argon, the radiation intensity of its wall was measured. The plasma was generated by injection of a continuous electron beam along a chamber made of quartz glass. For the operating modes of the reactor with repetitively pulsed injection of an electron beam, experimental data regarding the radiation intensity evolution of the decaying plasma were obtained for several plasma-forming gas (argon) pressure values. Durations of various decay phases were found.

## **KEYWORDS**

NON-TEMPERATURE NON-EQUILIBRIUM PLASMA, FOREVACUUM PRESSURE PLASMA-CHEMICAL REACTOR, NON-STATIONARY PROCESSES

## **ВВЕДЕНИЕ**

Успехи в технике проводки электронных пучков из вакуума в плотные газообразные среды и аэрозоли, находящиеся в форвакуумном диапазоне давлений ( $0,1 <$

$P_m < 10$  кПа), позволили создать особый класс плазмотехнических систем на основе плазмы, генерируемой электронными пучками – электронно-пучковой плазмы (ЭПП) [1].

Пучково-плазменные установки являются перспективными аппаратами «зеленой» химии; они могут применяться в различных производственных областях, аэрокосмической и энергетической отраслях, биологии и медицине. ЭПП-системы обеспечивают формирование реакционных сред со сверхнеравновесными концентрациями химически активных частиц в совокупности с интенсивными потоками высокоэнергетичных электронов. Такая комбинация факторов весьма полезна для технологий производства новых конструкционных, порошковых и композиционных материалов, осаждения и синтеза функциональных покрытий, модификации природных и синтетических полимеров и биополимеров, а также при обработке и очистке различных поверхностей, газовой конверсии, переработки промышленных, бытовых и сельскохозяйственной отходов.

Использование для формирования реакционных объемов импульсно-периодических электронных пучков в совокупности с возможностью пространственного сканирования пучка расширяют области применения ЭПП для модификации и функционализации обрабатываемых веществ, создания сложных градиентных структур и паттернов на поверхности материалов. Кроме того, такие режимы позволяют повысить энергоэффективность плазмохимических реакторов за счет осуществления плазменных процессов в распадающейся плазме.

В импульсно-периодических режимах работы пучково-плазменного реактора, а также при сканировании электронного пучка по реакционному объему и/или по обрабатываемой поверхности неизбежно возникают специфические нестационарные процессы, как в плазме, так и в материале, которые могут существенно повлиять на свойства ЭПП и, следовательно, результат модификации. Плазменные эффекты главным образом связаны с процессами распада плазмы после прекращения действия ионизатора. Процессы в обрабатываемом материале обусловлены периодическим нагревом/охлаждением зоны пучково-плазменного воздействия и запуском плазмохимических процессов, которые могут продолжаться и без воздействия электронного пучка.

Основной целью данной работы является изучение нестационарных процессов в пучково-плазменных плазмохимических реакторах форвакуумного диапазона давлений, работающих в импульсно-периодических режимах и в режимах со сканированием электронного пучка.

Важнейшей характеристикой формирующегося плазменного объема является мощность энерговыделения в различных зонах реакционной камеры. Именно от этой величины зависят многие параметры протекающих плазменных процессов, например, скорости плазмохимических реакций [2]. Поэтому также было проведено экспериментальное исследование пространственного распределения энерговыделения в объеме ЭПП для одной из наиболее часто используемых конструкций пучково-плазменного реактора.

## МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Исследования пространственного распределения энерговыделения ( $Q$ ) проводили в плазмохимическом реакторе, конструкция и принцип работы которого детально описаны в работах [1, 3]. Все эксперименты (в том числе и по изучению распада ЭПП) проводились с плазмой, генерируемой внутри диэлектрического контейнера цилиндрической

геометрии с диаметром  $D \approx 20$  мм, стенки которого ограничивали радиальные размеры плазменного объема. В ходе экспериментов в нескольких поперечных сечениях контейнера регистрировали суммарное оптическое излучение ЭПП внутри контейнера (кварцевой трубки) и люминесценцию кварца. Предполагалось, что интенсивность излучения ( $B$ ) в данном поперечном сечении пропорциональна мощности энерговыделения в этом сечении.

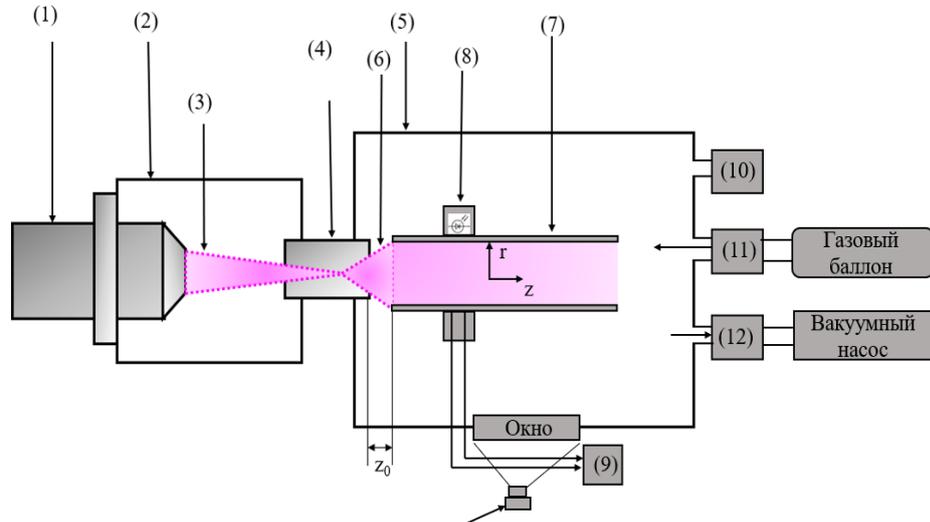


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: (1) – электронная пушка, (2) – высоковакуумная камера, (3) – электронный пучок, (4) – выводное окно, (5) – рабочая камера, (6) – облако электронно-пучковой плазмы, (7) – диэлектрический контейнер, (8) – фотодиод, (9) – осциллограф, (10) – вакуумметр, (11) – натекатель, (12) ПИД-регулятор

Рис. 1 иллюстрирует постановку экспериментов [4]. Тонкий электронный пучок (ЭП) (3), предварительно сформированный в высоковакуумной камере (2) электронной пушкой (1), инжектировался в заполненную плазмообразующим газом рабочую камеру (5) через выводное устройство (4) (газодинамическое окно). Отрезок кварцевой трубки (7) размещался в рабочей камере так, чтобы ее ось совпадала с осью инъекции пучка, а электронно-пучковая плазма (6) была локализована внутри трубки. Это обеспечивалось надлежащим выбором расстояния  $z_0$  между трубкой и выводным окном. Оптическое излучение ЭПП регистрировалось широкополосным фотодиодом ВРХ-90 (8), сигнал которого выводился на один из каналов двухлучевого компьютерного осциллографа (9). На второй канал осциллографа выводился сигнал с вакуумметра (10), который измерял давление  $P_m$  в рабочей камере (5). Величина  $P_m$  регулировалась по заданному алгоритму настройками натекателя (11) и контроллера (12) производительности вакуумной откачки.

В ходе экспериментов для некоторых сечений кварцевой трубки ( $z_1, z_2, z_3$ ) в автоматическом режиме регистрировалась и записывалась в виде Excel-файла функция  $B(P_m)$ . Кроме этого через окно в стенке рабочей камеры (5) для нескольких давлений ( $P_{m1}, P_{m2}, P_{m3}$ ) производилось фотографирование трубки ПЗС-камерой. Для построения функции  $B(z)$  полученные изображения обрабатывались специальной программой, написанной на языке Python [4].

Когда пучково-плазменный реактор работает в импульсно-периодическом режиме или в режиме сканирования ЭП по реакционному объему, наблюдаются распадные явления: после выключения ЭП (или при отклонении пучка от первоначального направления инъекции) плазма еще некоторое время существует и излучает. Распад ЭПП

изучался посредством исследования эволюции интегральной интенсивности излучения плазмы  $V(t)$ , с помощью фотоумножителя ФЭУ-106 (МЭЛЗ, Россия) при этом проводились

- широкополосные измерения в диапазоне длин волн 250–800 нм;
- более детальные измерения на длинах волн ультрафиолетового-синего поддиапазона ( $300 < \lambda < 400$  нм) и красного-ближнего ИК поддиапазона ( $500 < \lambda < 800$  нм). Для этого применялись светофильтры, устанавливавшиеся перед ФЭУ.

Эксперименты выполнялись при различных условиях генерации ЭПП и частотах модуляции ЭП в диапазоне 10–250 Гц. Варьировались следующие параметры [5]:

- ускоряющее напряжение  $U = 25\text{--}30$  кВ
- давление газа (аргон),  $P_m = 1\text{--}20$  Торр;
- ток инжектируемого ЭП,  $I_b = 2\text{--}10$  мА;
- время предварительной дегазации и промывки рабочей камеры чистым аргоном.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 2а в виде безразмерного отношения  $V/V_{max}$ , где  $V_{max}$  – интенсивность излучения наиболее яркой точки изображения, представлены продольные профили распределения интенсивности свечения трубки. По мере роста давления максимум распределения смещается в сторону выводного устройства (т.е. точки инжекции ЭП в камеру). Рис. 2б иллюстрирует влияние давления на профили  $V/V_{max}$  в разных сечениях трубки. Видно, что функция  $V(P_m)$  для каждого сечения трубки также имеет максимум при некотором давлении  $P_m^*$ .

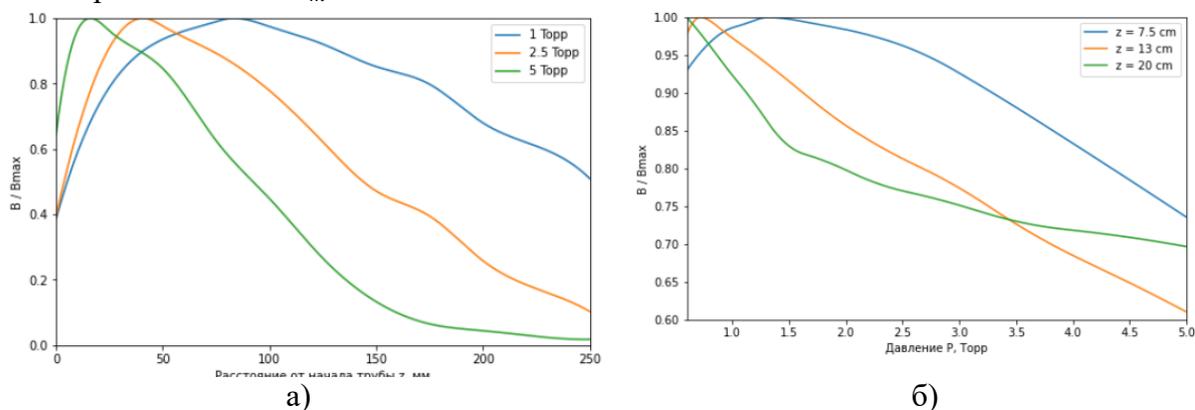


Рис. 2. Отношение  $V/V_{max}$  при варьировании давления плазмообразующего газа: (а) при разных расстояниях  $z$  между входным отверстием трубы и выводным окном; (б) в разных сечениях трубки, заполненной ЭПП аргона

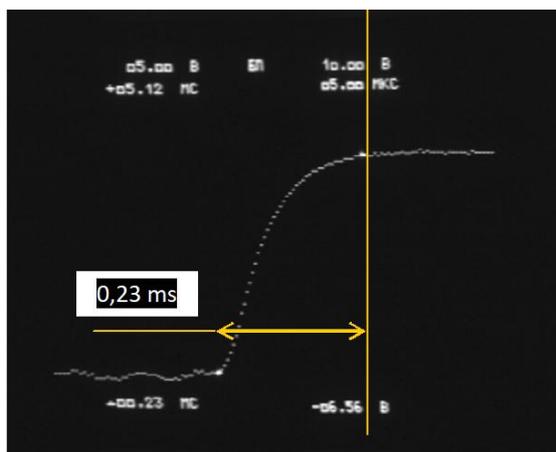


Рис. 3. Типичная оциллограмма сигнала фотоумножителя, полученная в экспериментах с распадающейся плазмой аргона при температуре  $\sim 500$  К

В экспериментах с распадающейся плазмой время жизни ЭПП характеризовалась двумя длительностями послесвечения ( $\tau_a$ ), а именно продолжительностью быстрого спада интенсивности излучения ( $\tau_{a1}$ ) и продолжительностью длительного послесвечения ( $\tau_{a2}$ ). На рис. 3 представлена типичная оциллограмма сигнала фотоумножителя [6].

Накопленные данные показывают, что в условиях проводившихся экспериментов:

1. Характерное время распада ЭПП аргона  $\tau_a$  не превышает 1000–2000 мкс, при этом  $\tau_{a1} \sim 10$  мкс,  $\tau_{a2} \sim 0,1$ –1 мс.
2. Короткоживущие возбужденные частицы ЭПП аргона ответственны за 95% суммарной энергии, высвечиваемой плазменным облаком: плазма высвечивает 95% полной энергии за первые  $\sim 10$  мкс своего послесвечения.
3. Вклад долгоживущих возбужденных частиц ЭПП аргона не превышает 5% полной энергии, высвечиваемой плазмой после выключения ЭП, т.е. за время 10–1000 мкс (может быть, 2000 мкс) плазма высвечивает только несколько процентов энергии своего послесвечения.
4. Измерения в плазме аргона, выполненные с применением светофильтров, дали следующие результаты:
  - $B(t)$ -функции идентичны для всех диапазонов спектра;
  - В любой момент затухания ЭПП УФ-излучение преобладает над красным излучением;
  - В любой момент распада ЭПП сумма интенсивностей УФ и красного излучения равна интегральной интенсивности излучения, если ток ЭП достаточно велик ( $I_b > 5$  мА):  $B_{UV} + B_{red} = B$ ;
  - В любой момент распада ЭПП  $B_{UV} + B_{red} < B$ , если ЭП слабый ( $I_b < 3$  мА).

Крайне важно, что характерные времена  $B$ -эволюции в ЭПП сильно зависят от содержания примесей в плазмообразующей среде. Даже небольшое загрязнение (0,01–0,1% воздухом и, особенно, кислородом) способно сократить время распада ЭПП аргона на 1–2 порядка по сравнению с распадом плазмы чистого Ar.

Это означает, что в нестационарных режимах работы пучково-плазменного реактора, характеризующихся наличием распадных процессов в ЭПП, имеется возможность управления параметрами реакционного объема за счет варьирования тока пучка и внесением в плазмообразующий газ специальных добавок.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В экспериментах с пучково-плазменным реактором форвакуумного давления выявлены закономерности, позволяющие управлять плотностью энерговыделения варьированием давления и химического состава плазмообразующего газа. Для реакционных камер цилиндрической геометрии (трубок, люминесцирующих под воздействием электронного пучка) по результатам измерения интегральной интенсивности свечения в нескольких поперечных сечениях трубки, установлено, что:

- При любом давлении  $P_m$  профиль интенсивности излучения  $B(z)$  имеет максимум  $B_{max}$  на некотором расстоянии от точки инжекции ЭП  $z$ , причем это расстояние уменьшается с ростом плотности плазмообразующего газа. При увеличении  $P_m$  этот максимум сдвигается в направлении к выводному устройству, т.е. в сторону меньших  $z$ , а уменьшение давления приводит к сдвигу максимума функции  $B(z)$  в противоположном направлении, т.е. к дальнему от выводного устройства концу трубки.
- При увеличении расстояния  $z$  между выводным устройством и сечением, в котором проводится измерение интенсивности излучения плазмы, максимальное значение функции  $B(P_m)$  уменьшается, причем это максимальное значение достигается при меньшем  $P_m$ . Уменьшение давления газа приводит к сдвигу максимума функции  $B(P_m)$  в противоположном направлении.
- При прочих равных условиях положение максимума функции  $B(z)$  зависит от молекулярной массы плазмообразующего газа: чем тяжелее газ, тем ближе к точке инжекции ЭП находится этот максимум.

Получены экспериментальные данные о времени высвечивания распадающейся электронно-пучковой плазмы в различных спектральных диапазонах и установлены характерные времена различных фаз распада ЭПП.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Vasiliev M., Vasilieva T. Beamplasmas: materials production. In: Encyclopedia of Plasma Technology, Shohet J.L. (Ed.) Taylor & Francis Inc.: Boca Raton, NY, USA, 152 (2016)
2. Васильев М.Н. Применение электронно-пучковой плазмы в плазмохимии. Энциклопедия низкотемпературной плазмы. Фортов В.Е. (Ред.), М.: Наука, Т. XI, 436 (2001)
3. Vasiliev M., Vasilieva T., Hein Aung Miat. Hybrid plasma chemical reactors for biopolymers processing, J. Phys. D: Appl. Phys., 52 335202 (2019)
4. Васильев М.Н., Чинь Ван Дык. Генерация электронно-пучковой плазмы форвакуумного давления в замкнутом объеме. Тезисы XVII международной научно-технической конференции «Вакуумная техника, материалы и технология», Москва, 72 (2023)
5. Аунг Мьят Хейн. Гибридная плазма газовых смесей как инструмент комбинированного воздействия на полимерные материалы с целью повышения их биосовместимости. Диссертация на соискание ученой степени кандидата наук по специальности «Физика плазмы», МФТИ: Москва (2019)
6. Хтет Ко Ко Зау. Исследование нестационарных процессов в пучково-плазменных реакторах, применяемых для обработки материалов и изделий медико-биологического

назначения. Диссертация на соискание ученой степени кандидата наук по специальности «Физика плазмы», МФТИ: Москва (2021)

## **СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ**

Чинь Ван Дык – студент магистратуры Московского физико-технического института, г. Долгопрудный, Московская обл. e-mail: ducphuc0311@gmail.com

Никитин Максим Константинович – студент магистратуры Московского физико-технического института, г. Долгопрудный, Московская обл. e-mail: nikitin.mk@phystech.edu

Васильев Михаил Николаевич – доктор технических, профессор (ORCID: 0000-0002-7586-5573). Объединенный институт высоких температур РАН, г. Москва. e-mail: mvasiliev2006@rambler.ru

Васильева Татьяна Михайловна – доктор технических наук, доцент (ORCID: 0000-0001-6103-6195). Объединенный институт высоких температур РАН, г. Москва. e-mail: tmvasilieva@gmail.com