

9. Kravets L.I., Yarmolenko M.A., Rogachev A.A., Gainutdinov R.V., Altynov V.A., Lizunov N.E. Deposition of double-layer coatings for preparing composite membranes with superhydrophobic properties. // High Temp. Mater. Proc. 2019. Vol. 23. P. 77–96.

10. Кравец Л.И., Гильман А.Б., Satulu V., Mitu B., Dinescu G. Формирование ‘diode-like’ композитных мембран методом полимеризации в плазме. // Перспективные материалы. 2017. № 9. С. 5–21.

11. Kravets L., Gainutdinov R., Gilman A., Yablokov M., Satulu V., Mitu B., Dinescu G. Morphology and wettability of polytetrafluoroethylene-like films deposited onto track-etched membrane surface in vacuum. // Plasma Phys. Technol. 2018. Vol. 5. P. 110–116.

12. Kravets L.I., Altynov V.A., Gilman A.B., Yablokov M.Yu., Satulu V., Mitu B., Dinescu G. Deposition of fluorinated polymer films onto track-etched membrane surface. // Romanian Reports in Physics. 2018. Vol. 70. No. 516.

### **ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКАЯ ЗАРЯДКА ПРОВОДЯЩИХ МИШЕНЕЙ В НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ СИЛЬНОНЕРАВНОВЕСНОЙ ПЛАЗМЕ Пониженного Давления**

### **ELECTROSTATIC CHARGING OF CONDUCTING TARGETS IN LOW-TEMPERATURE NON-EQUILIBRIUM LOW-PRESSURE PLASMA**

**Аунг Чжо У** / aungkyaw@phystech.edu (ORCID: 0000-0003-4799-3284)

**Йе ХлаингТун** / yehlainghtun@phystech.edu (ORCID: 0000-0002-3559-9717)

**Васильев М.Н.** / vasiliev.mn@mipt.ru

**Хтет Ко КоЗав** / htetkozaw536@gmail.com (ORCID: 0000-0002-8552-4633)

**Васильева Т.М.** / tmvasilieva@gmail.com (ORCID: 0000-0001-6103-6195)

**Aung Kyaw Oo** (ORCID: 0000-0003-4799-3284)

**Ye Hlaing Htun** (ORCID: 0000-0002-3559-9717)

**Vasiliev M.N.**,

**Htet Ko KoZaw** (ORCID :0000-0002-8552-4633)

**Vasilieva T.M.** (ORCID: 0000-0001-6103-6195)

Московский физико-технический институт Московская обл., г. Долгопрудный.

*Рассмотрены физические процессы, протекающие при взаимодействии сильнонеравновесной электронно-пучковой плазмы, генерируемой при пониженном давлении, с макроскопическими проводящими объектами, расположенными внутри контейнера, находящегося в реакционном объеме.*

*Physical processes occurring during the interaction of a strongly non-equilibrium low-pressure generated electron-beam plasma with macroscopic objects inserted in a reaction volume are considered.*

*Ключевые слова: электронно-пучковая плазма, электростатическая зарядка тел в плазме.*

*Keywords: electron-beam plasma, electrostatic charging of bodies in plasma.*

### **ВВЕДЕНИЕ**

В пучково-плазменных системах технологического назначения имеет место взаимодействие электронных пучков и/или возбуждаемой ими неравновесной плазмы с

поверхностью твердого тела или частицами конденсированной дисперсной фазы. Такое взаимодействие характерно для плазмохимических реакторов, используемых для производства материалов, поверхностной обработки изделий, переработки порошков различной природы. При определенных условиях в пучково-плазменных реакторах возможна электростатическая зарядка элементов конструкции реакционной камеры, обрабатываемых изделий и частиц конденсированной дисперсной фазы, если плазмообразующая среда содержит распыленную жидкость или порошок [1].

Электростатическая зарядка может существенно повлиять на рабочие процессы в плазмохимических реакторах, на устойчивость реакционного объема, а также вызвать повреждение реактора или материалов при их обработке. Таким образом, накопление электростатического заряда объектами, контактирующими с электронно-пучковой плазмой (ЭПП), во многом определяет функционирование пучково-плазменных систем в целом. Экспериментальное исследование процессов и явлений, связанных электростатической зарядкой элементов конструкции пучково-плазменных реакторов и обрабатываемых в них материалов и явилось целью настоящей работы.

## МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

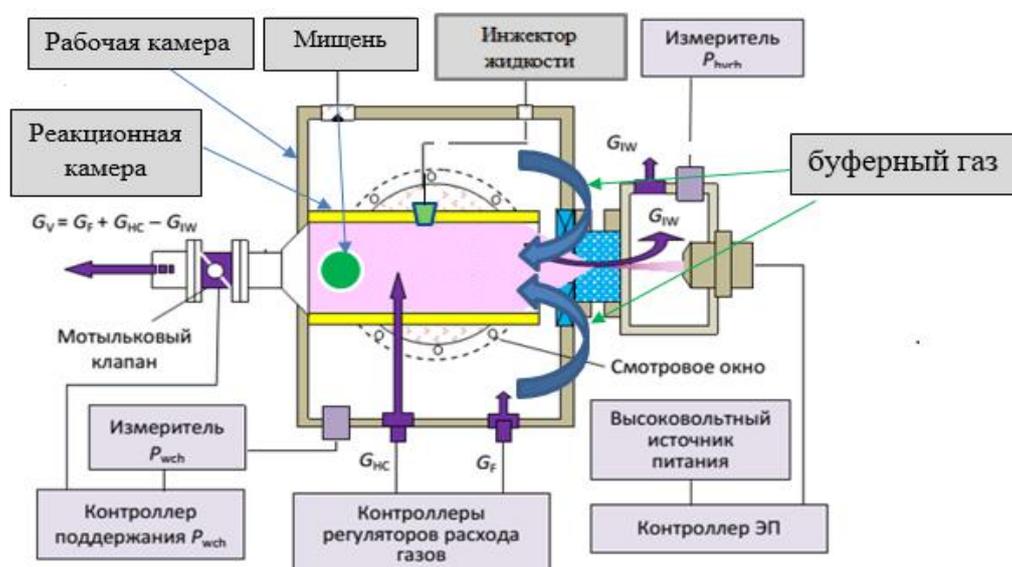


Рис.1. Схема экспериментальной установки (вариант с цилиндрической реакционной камерой (коаксиальная конфигурация)).

Процессы электростатической зарядки элементов конструкции реакционной камеры, размещаемых в ней мишеней определяются:

- параметрами первичного пучка (начальной энергией электронов  $E_b$  и током пучка  $I_b$ ),
- полным давлением  $P_m$  в реакционной камере и парциальными давлениями компонентов плазмообразующей смеси  $P_i$ ,
- скоростью потока плазмы в реакционной камере  $w$ ,
- концентрацией и размерами частиц конденсированной дисперсной фазы,
- геометрией реакционного объема, в том числе размеров реакционной камеры, расположением почки инжекции жидкости или порошка, размерами мишени и др.

В реакционную камеру можно поместить мишень достаточно большого размера. В этом случае для вычисления скорости обтекания мишени газовым потоком необходимо учесть частичное перекрытие сечения цилиндрического канала мишенью, т.е. изменение проходного сечения реакционной камеры.

Принципиальная схема наиболее универсального варианта экспериментальной установки и методика эксперимента показана на рис. 1. Этот вариант применялся для экспериментов в коаксиальной конфигурации реакционного объема, когда электронный пучок инжектировался вдоль цилиндрической реакционной камеры. В такой камере можно формировать неподвижные газовые и парогазовые пучково-плазменные образования, а также плазменные потоки. Один конец реакционной камеры был герметично соединен с откачной магистралью, а второй торец камеры оставался открытым. Буферный газ с расходом  $G_F$  подавался рабочую камеру, а дополнительный газ с расходом  $G_{НС}$  вдувался непосредственно в реакционную камеру. Была предусмотрена возможность подачи обоих газов в рабочую камеру для их предварительного смешения и подготовки плазмообразующей смеси. С точностью до небольшой по величине утечки газа через выводное окно  $G_{1W}$  для поддержания стационарного значения давления газа (газовой смеси) необходимо, чтобы  $G_F + G_{НС} = G_V$ , где  $G_V$  – производительность вакуумной откачки. Подбирая величины  $G_F$ ,  $G_{НС}$  и  $G_V$  можно управлять скоростью потока газа  $w$  вдоль реакционной камеры [2].

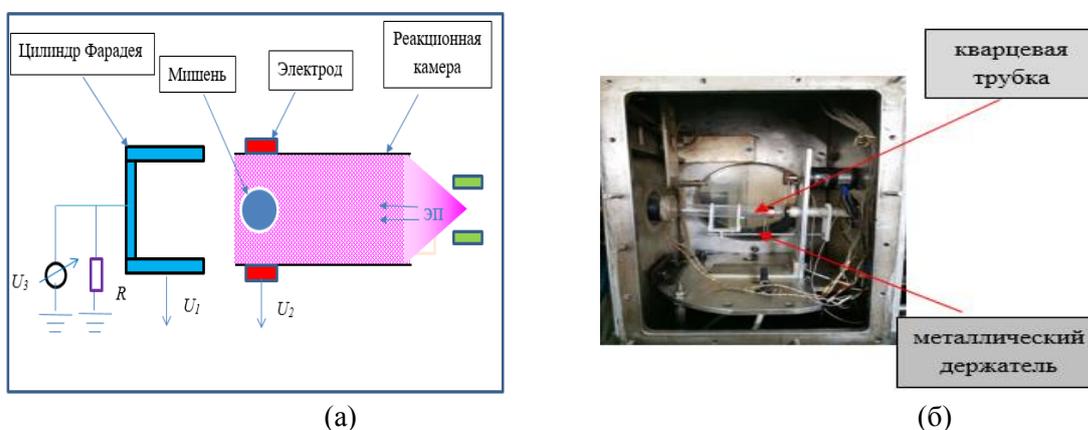


Рис. 2. Измерение электрического потенциала мишеней и элементов конструкции реакционной камеры. а – схема эксперимента:  $U_1$ ,  $U_2$ ,  $U_3$  – сигналы, снимаемые с цилиндра Фарадея, мишени и кольцевого электрода, расположенного на внешней стороне диэлектрической части реакционной камеры соответственно, б – общий вид комбинированной реакционной камеры.

Наиболее полезную информацию об электростатической зарядке макроскопических тел в ЭПП дали эксперименты, которые проводились с использованием комбинированной (т.е. имеющей электропроводящие и диэлектрические элементы) реакционной камеры специальной конструкции (рис. 2). На Рис. 2б дана фотография такой комбинированной реакционной камеры. Диэлектрическим элементом этой камеры был отрезок кварцевой трубы со внутренним диаметром 22 мм. На дальнем от выводного окна конце трубы устанавливался цилиндр Фарадея, который имитировал электропроводящую часть комбинированной реакционной камеры и/или ее металлическое дно и потенциал  $U$  которого измерялся относительно заземленных элементов рабочей камеры.

Если внутри диэлектрической части реакционной камеры помещалась мишень, то снаружи кварцевой трубки устанавливался кольцевой электрод (Рис. 2а). Электрические сигналы, снимаемые с цилиндра Фарадея, мишени и кольцевого электрода ( $U_1$ ,  $U_2$ ,  $U_3$  соответственно) измерялись цифровыми вольтметрами с большим входным сопротивлением или компьютерным осциллографом. В большинстве экспериментов для регистрации перечисленных сигналов применялся аналого-цифровой преобразователь.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

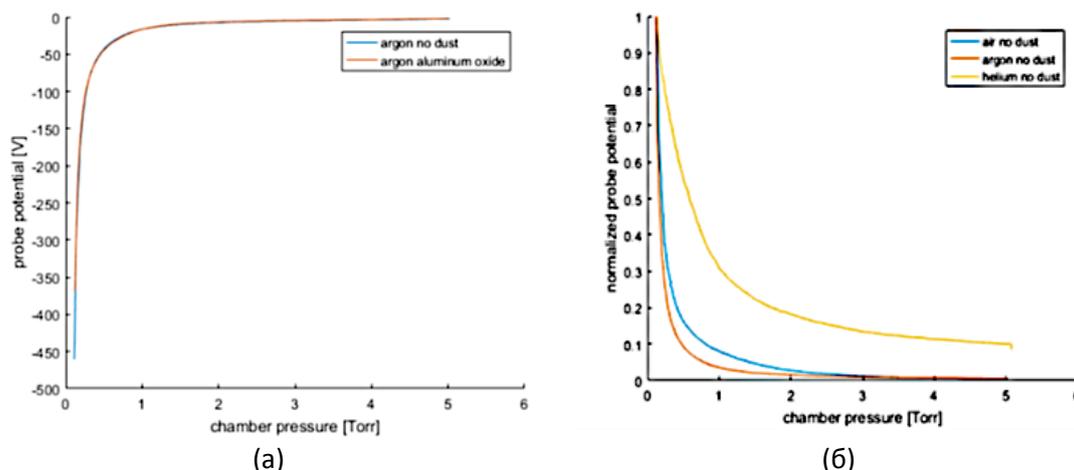


Рис.3. Электростатическая зарядка дна реакционной камеры, заполненной неподвижной ЭПП различных газов, как функция давления плазмообразующего газа ( $P_m$ ): а – потенциал  $U$  (В) дна реакционной камеры, заполненной ЭПП аргона, б – относительные величины потенциала дна реакционной камеры, заполненной ЭПП аргона (красная линия), воздуха (синяя линия) и гелия (желтая линия,  $U/U_{max}$ ).

При исследовании электростатической зарядки дна реакционной камеры, заполненной неподвижной ЭПП в зависимости от давления плазмообразующего газа,  $P_m$ . В этой серии экспериментов ток пучка устанавливался небольшим ( $I_b \leq 2$  мА) во избежание нагрева реакционной камеры, в том числе – цилиндра Фарадея. Камера постепенно заполнялась различными газами, давление  $P_m$  которых варьировалось в диапазоне 0,1-5,0 Торр. Из экспериментально найденных зависимостей, представленных на Рис. 3 видно, что при малых  $P_m$  потенциал дна реакционной камеры отрицателен и может достигать нескольких сотен вольт. С ростом давления плазмообразующего газа этот потенциал сначала быстро падает по абсолютной величине, а затем при  $P_m$  в диапазоне 0,5-2,0 Торр (в зависимости от того, какой газ используется) это падение замедляется. После этого потенциал  $U$  становится равным плавающему потенциалу плазмы и не превышает нескольких вольт.

Аналогичные эксперименты были проведены с дисковыми и сферическими коллекторами электронов, расположенными внутри реакционной камеры. Диск мог поворачиваться вокруг его центральной хорды, при этом угол падения  $\varphi$  электронного пучка на плоскость диска изменялся от нуля до  $\pi/2$ . Результаты этой серии экспериментов приведены в Таблицах 1 и 2.

Таблица 1.

Максимальные и минимальные значения потенциал медного диска (диаметр 18 мм), вращающегося в ЭПП воздуха и кислорода при давлениях  $P_m = 1$  Торр и  $P_m = 3,0$  Торр; ток пучка  $I_b = 1$  мА.

	$U_{max}$ (В) при $\varphi = 90^\circ$		$U_{min}$ (В) при $\varphi = 0^\circ$	
	$P_m = 1,0$ Торр	$P_m = 3,0$ Торр	$P_m = 1,0$ Торр	$P_m = 3,0$ Торр
Воздух	4,2	0,7	0,2	0,2
Кислород	3,1	0,6	0,3	0,1

Таблица 2.

Зависимость потенциала медного диска (диаметр 18 мм) от угла его поворота для ЭПП воздуха:

$$I_b = 1 \text{ мА}, P_m = 1 \text{ Торр и } P_m = 3,0 \text{ Торр}$$

$\varphi$ , град	0	15	30	45	60	75	90
$U_{max}$ , В	4,7	4,5	3,4	2,5	1,2	0,6	0,3
$U/U_{max}$	1,0	0,95	0,75	0,53	0,25	0,12	0,06

Величина потенциала, накапливаемого мишенью в виде плоского диска, которая помещена в контейнер, заполненный электронно-пучковой плазмой, зависит от угла между осью инъекции пучка и плоскостью мишени  $\varphi$ . Когда  $\varphi = 90^\circ$  величина потенциала максимальна ( $U_{max}$ ). При уменьшении  $\varphi$  потенциал мишени немонотонно уменьшается, достигая своего минимального значения ( $U_{min}$ ), когда  $\varphi = 0^\circ$ . Тот факт, что в последнем случае этот потенциал не равен нулю, объясняется зарядкой мишени электронами, которые падают на нее под углом, не равном нулю. Такими электронами являются электроны, отраженные стенкой канала и электроны, рассеянные в столкновениях с молекулами плазмообразующего газа.

Максимальная (при  $\varphi = 90^\circ$ ) и минимальная (при  $\varphi = 0^\circ$ ) величина потенциала зависят от химического состава плазмообразующего газа и его давления. В экспериментах с воздухом и кислородом установлено, что в исследованном диапазоне  $P_m$  максимальные величины потенциала диска в плазме воздуха выше, чем в плазме кислорода, а минимальные величины потенциала практически одинаковы. Увеличение давления плазмообразующего газа приводят к уменьшению и максимальной, и минимальной величины потенциала в плазме обоих газов. На установившееся значение  $U_{max}$  величина давления  $P_m$  в реакционной камере должна влиять в силу, по крайней мере, двух причин:

- уменьшения плотности тока пучка, падающего на мишень из-за рассеяния и поглощения ЭП на длине  $z$ ;
- интенсификации теплообмена между нагретой мишенью и окружающим ее газом (плазмой).

В контексте влияния нагрева мишени на величину потенциала  $U$  следует рассматривать и эффекты, наблюдавшиеся в экспериментах с обдувом мишеней потоком ЭПП.

Эксперименты проводились с металлическими сферами, установленными на оси кварцевой трубы, вдоль которой продувался воздух как показано на Рис. 1. Ток ЭП варьировался в диапазоне 0,5-1,5 мА, а давление газа в канале поддерживалось постоянным  $P_m = 1,6$  Торр. Величина давления выбрана неслучайно: при таком, достаточно низком, давлении мишень не находится под плавающим потенциалом плазмы.

Таблица 3.

Влияние обдува сферы (диаметр 9 мм) потоком электронно-пучковой плазмы воздуха на ее электростатическую зарядку в канале диаметром 22 мм,  $P_m = 1,6$  Торр

$w$ , м/с	$I_b$ , мА	$U$ , В
0	0,5	14
0	1,5	32
10	0,5	8
10	1,5	14

Из данных, приведенных в Таблице 3 для расхода газа через канал при  $G = 2$  л/мин ( $w \approx 10$  м/с), следует, что в потоке плазмы потенциал сферической мишени существенно ниже, чем ее потенциал в неподвижном плазменном облаке. На больших токах  $I_b$  влияние обдува проявляется сильнее. Обнаруженный эффект требует более детального исследования и объяснения, поскольку он может оказаться весьма важным при проектировании плазмотехнических систем проточного типа.

## **ВЫВОДЫ**

Исследована электростатическая зарядка элементов конструкции реакционной камеры и макроскопических тел, помещенных в газофазный реакционный объем применительно к задачам конструирования электронно-пучковых плазмохимических реакторов проточного типа. При этом получены зависимости, характеризующие влияние условий генерации электронно-пучковой плазмы на величину потенциала  $U$  металлических мишеней в виде сфер и дисков, размещенных в диэлектрических реакционных камерах коаксиальной конфигурации. Установлено, что на величину потенциала мишеней существенным образом влияют: (1) сила тока пучка; (2) давление плазмообразующего газа; (3) интенсивность обдува мишени плазменным потоком.

## **ЛИТЕРАТУРА**

1. M. Vasiliev, T. Vasilieva. Materials production with Beam Plasmas // In Encyclopedia of Plasma Technology (Ed. J.L. Shohet, Taylor & Francis), 2017. P. 152-166.
2. Васильев М.Н., Ворона Н.А., Гавриков А.В., Петров О.Ф., Сидоров В.С., Фортон В.Е. Аномально высокая зарядка дисперсных частиц электронным пучком энергией 25 кэВ // Письма в ЖЭТФ. 2010. Т. 36, № 24. С. 54-60.