

УДК 533.9.072

*Йе Хлаинг Тун, Аунг Чжо У, М. Н. Васильев, Хтет Ко Ко Зау,
Зин Мин Маунг, Яр Зар Аунг*

Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)

Управление электростатической зарядкой твердых тел в каналах, заполненных электронно-пучковой плазмой

Экспериментально исследована электростатическая зарядка макроскопических твердых тел, размещенных в цилиндрическом канале, заполненном холодной сильнонеравновесной плазмой. Плазма генерировалась инжекцией тонкого электронного пучка вдоль оси канала. В качестве плазмообразующих газов использовались воздух, кислород и инертные газы. Измерялась величина потенциала тел простейшей геометрии (сфера, диск) относительно заземленных элементов конструкции рабочей камеры экспериментальной установки; эксперименты проводились в неподвижной плазме и в плазменных потоках. Установлено, что на величину заряда, накапливаемого твердым телом, влияют химический состав и давление плазмообразующего газа, мощность инжектируемого электронного пучка, скорость плазменного потока, а также угол падения электронного пучка на поверхность тела (для мишеней в форме диска).

Ключевые слова: электронно-пучковая плазма, электростатическая зарядка твердых тел, плазменные потоки в каналах.

*Ye Hlaing Tun, Aung Kyaw Oo, Vasiliev M. N, Htet Ko Ko Zaw, Zin Min Maung,
Ya Zar Aung*

Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University)

Control of electrostatic charging of solids in channels filled with electron beam plasma

Electrostatic charging of macroscopic solids placed in a cylindrical channel filled with cold strongly nonequilibrium plasma is experimentally studied. Plasma is generated by injection of a thin electron beam along the channel axis. Air, oxygen and noble gases are used as plasma-generating gases. The value of the potential of bodies of the simplest geometry (sphere, disk) is measured relative to the grounded parts of the experimental setup; the experiments are carried out in both stationary plasma and plasma flows. The value of the charge accumulated by solids is found to depend on the chemical composition and pressure of the plasma-generating gas, the power of the injected electron beam and the plasma flow velocity, and on the angle of the electron beam incidence on the surface (for bodies in the form of a disk).

Key words: electron beam plasma, electrostatic charging of solids, plasma flows in channels.

1. Введение

Электростатика – одна из главных проблем эксплуатации техники, работающей в условиях открытого космоса. В настоящее время наиболее изученными являются процессы, приводящие к электростатической зарядке космических летательных аппаратов (КЛА)

© Йе Хлаинг Тун, Аунг Чжо У, Васильев М. Н, Хтет Ко Ко Зау, Зин Мин Маунг, Яр Зар Аунг, 2021

© Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)», 2021

под воздействием факторов космического полета, в первую очередь – облучения быстрыми электронами солнечного ветра. Этой проблематике посвящено множество работ [1, 2].

Непрерывный поток плазмы солнечного происхождения, падающий на поверхность КЛА, вызывает появление и накопление электростатического заряда заборными элементами конструкции, а также их дифференциальную зарядку, приводящую к электрическим разрядам по поверхности из-за высокой разности потенциалов между различными зонами этих конструкций. Последнее обстоятельство может спровоцировать аномальное поведение электроники КЛА. Перечисленные явления достаточно хорошо изучены и экспериментально, и теоретически, найдены способы нейтрализации электростатического заряда КЛА как интегрального, так и локального [3].

Значительно меньшее внимание уделялось исследованию внутренних электрофизических процессов в бортовых плазмотехнических системах, в которых имеет место контакт неравновесной плазмы с поверхностью твердого тела. В самой общей постановке физическая задача ставится следующим образом: неравновесная плазма заполняет некоторый контейнер, внутри которого могут располагаться какие-либо макроскопические тела. Очевидно, что и стенки контейнера, и объекты, которые в нем находятся, могут накапливать электростатический заряд, что во многом определяет плазменные процессы в таких системах. Экспериментальному исследованию этих процессов посвящена настоящая работа.

2. Постановка экспериментов

В наших экспериментах холодная сильнонеравновесная плазма возбуждалась внутри цилиндрического канала, заполненного плазмообразующим газом, инъекцией тонкого непрерывного пучка быстрых электронов вдоль оси цилиндра (ось z). В канале могли располагаться макроскопические тела простейшей геометрии, которые имитировали элементы внутренней оснастки реальной плазмотехнической системы. Эксперименты могли проводиться как в неподвижной плазме, так и в плазменном потоке. В последнем случае вдоль канала организовывалась продувка плазмообразующего газа. Варианты постановки экспериментов (см. рис. 1а, б):

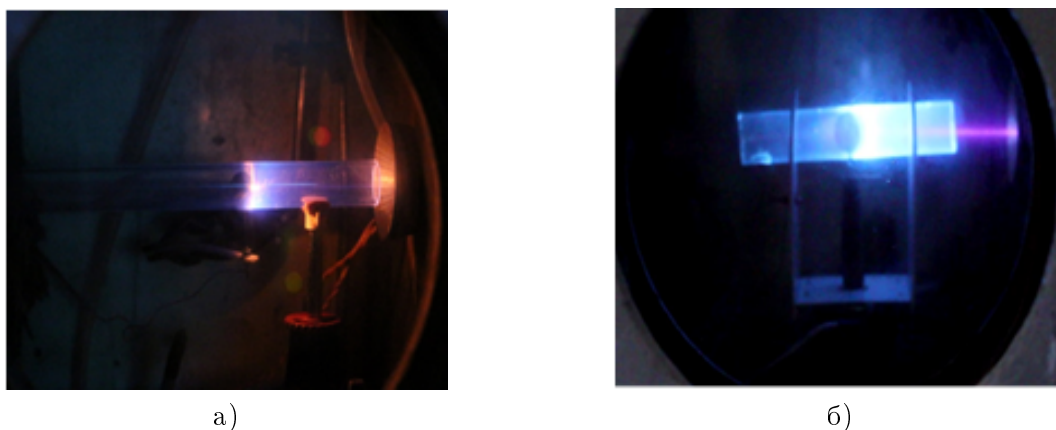


Рис. 1. а) Генерация электронно-пучковой плазмы внутри кварцевой трубки со сферическим теплом, установленным на ее оси, $D = 22$ мм, $d = 9$ мм; б) генерация электронно-пучковой плазмы внутри кварцевой трубки с установленным внутри нее диском, $D = 22$ мм, $d = 18$ мм

- Материал канала: металл или диэлектрик.
- Твердое тело, размещаемое внутри канала: материал – металлы или углерод (графит), форма – сфера или диск.
- Режимы течения плазмы в канале: неподвижная плазма, плазменный поток с продольной или тангенциальной подачей плазмообразующего газа.

Для создания плазмы внутри канала использовался генератор электронно-пучковой плазмы, подробно описанный в нашей предыдущей работе [4]. В этом генераторе, кроме состава плазмообразующего газа, могли варьироваться:

- Давление плазмообразующего газа P_m в диапазоне 0,1–10 Торр.
- Ток электронного пучка I_b в диапазоне 0–20 мА.
- Скорость плазменного тока (w) в диапазоне 0–200 м/с.
- Угол поворота диска в плоскости, перпендикулярной оси инжекции электронного пучка (φ) от 0 до $\pi/2$.

Диапазон варьирования энергии быстрых электронов был весьма ограниченным $E_b = 25 - 30$ кэВ, и, следовательно, интегральная мощность, вкладываемая в газ, в стенки канала и в расположенные в нем объекты, практически полностью определялась величиной тока электронного пучка.

3. Цель и задачи экспериментального исследования

Целью исследования было изучение влияния условий, в которых проводились эксперименты, на процессы зарядки металлических тел, контактирующих с неподвижным облаком или потоком электронно-пучковой плазмы. Если в работе [4] основное внимание уделялось эффектам, связанным с составом и давлением плазмообразующего газа, то в настоящей работе изучалась роль термогазодинамических процессов на поверхности тела и влияние геометрических параметров, характеризующих постановку эксперимента. При этом исследовалось влияние нагрева тела в электронно-пучковой плазме на накопление им электростатического заряда, а также возможность управления этим процессом за счет интенсивности обдува тела потоком плазмы. К геометрическим параметрам, характеризующим постановку экспериментов, относятся соотношение размера (диаметра D) канала и диаметра d размещенного в нем сферического тела, расстояние z между поверхностью тела и точкой инжекции электронного пучка, а также угол падения электронного пучка на поверхность диска, φ .

4. Экспериментальные результаты

Под воздействием электронного пучка на находящемся в плазме твердом теле может накапливаться отрицательный электрический заряд, что проявляется как возникновение некоторой разности потенциалов между телом и «землей». Было установлено, что при включении пучка абсолютная величина разности потенциалов возрастает от нуля до некоторого ΔU за время одного порядка со временем выхода I_b на стационарное значение, определяемое характеристиками системы управления генератором электронного пучка. Если условия эксперимента (мощность пучка и давление газа в канале) таковы, что возможен нагрев мишени, то по мере разогрева мишени разность потенциалов продолжает плавно расти выше ΔU , достигая, в конце концов, некоторого нового стационарного значения ΔU_{\max} .

На рис. 2а представлена зависимость, характеризующая рост отношения $\Delta U/(\Delta U)_0$, при увеличении температуры мишени T_s , где $(\Delta U)_0$ – разность потенциалов между мишенью и «землей» при $T_s \approx 100$ С. Условия эксперимента: $E_b = 25$ кВ, $I_b = 10$ мА, $z = 200$ мм, мишень – стальной шар диаметром 9 мм. В качестве измерительного прибора использовался цифровой вольтметр В7-35 с входным сопротивлением $10 \pm 0,5$ МОм. Измерения проводились вплоть до таких температур мишени, когда рост функции $\Delta U/(\Delta U)_0 = f(T_M)$ становился слабым: для гелия это $T_M \approx 500$ °С, а для аргона и воздуха – $T_M \approx 300$ °С. Температура мишени измерялась вольфрам-рениевой термопарой ВР 5/20. Расстояние z отсчитывалось от точки инжекции электронного пучка в контейнер.

Рис. 2б показывает, как установившееся значение ΔU_{\max} зависит от условий эксперимента. В качестве примера на этом рисунке приведены графики зависимости разности потенциалов ΔU_{\max} между мишенью в виде стального шара диаметром 18 мм и заземленным корпусом рабочей камеры экспериментальной установки как функция статического

давления в канале P_m и расстояния между мишенью и точкой инъекции электронного пучка z . При уменьшении давления в канале ΔU_{\max} почти обратно пропорционально $(P_m)^{1/2}$. Сначала при достаточно высоких давлениях ($2,0 < P_m < 5,0$ Торр) наблюдается медленный рост ΔU_{\max} ; при дальнейшем понижении P_m разность потенциалов ΔU_{\max} начинает быстро нарастать и при $P_m < 0,5$ Торр рост разности потенциалов приобретает лавинообразный характер. На рис 2б видно также, что по мере приближения тела к точке инъекции пучка его потенциал возрастает.

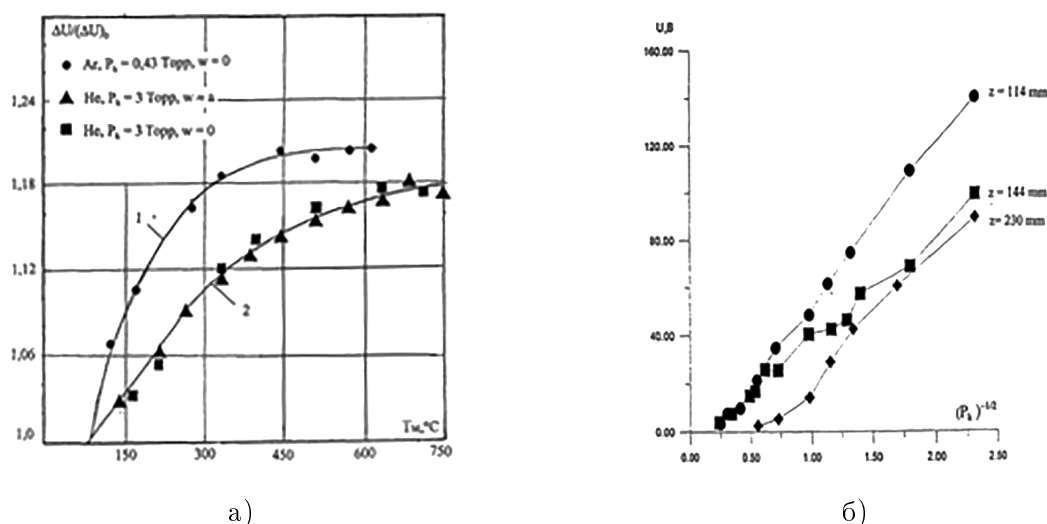


Рис. 2. а) Влияние температуры мишени на величину потенциала стальной сферы диаметром 9 мм, в электронно-пучковой плазме аргона (кривая 1) и гелия (кривая 2): $E_b = 25$ кВ, $I_b = 10$ мА, $z = 150$ мм; б) зависимость потенциала диска диаметром 18 мм от давления в канале на различных расстояниях z . Плазмообразующий газ – воздух, $I_b = 10$ мА, $E_b = 25$ кВ, $\varphi = \pi/2$

В исследованном диапазоне значений тока инжектируемого пучка ($I_b = 1 \div 20$ мА) ΔU_{\max} пропорционален I_b , что соответствует результатам, которые были нами ранее получены в экспериментах с телами, находящимися в свободном плазменном объеме, когда $D \gg d$.

Т а б л и ц а 1

Максимальные и минимальные значения потенциал медного диска ($d = 18$ мм), вращающегося в электронно-пучковой плазме 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	4,7	0,7	0,2	0,2
Кислород	3,1	0,6	0,3	0,1

Т а б л и ц а 2

Зависимость потенциала мишени (медный диск $d = 18$ мм) от угла ее поворота φ для электронно-пучковой плазмы воздуха: $I_b = 1$ мА, $P_m = 1,0$ Торр

φ , 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

Табл. 1 и 2 характеризуют зависимость потенциала мишени в виде диска от угла падения электронного пучка на ее поверхность φ . Диск был установлен внутри диэлектри-

ческого контейнера, как показано на рис. 1б, и мог поворачиваться, чтобы исследовать зависимость $\Delta U_{\max}(\varphi)$.

Данные табл. 1 и 2 показывают, что

- Величина потенциала, накапливаемого мишенью в виде плоского диска, которая помещена в контейнер, заполненный электронно-пучковой плазмой, зависит от угла между осью инжекции пучка и плоскостью мишени φ . Когда $\varphi = 90^\circ$ величина потенциала ΔU_{\max} максимальна. При уменьшении φ потенциал мишени немонотонно уменьшается, достигая своего минимального значения, 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.

Табл. 3 иллюстрирует эффект влияния движения электронно-пучковой плазмы на электростатическую зарядку тела, помещенного в плазменный поток. Эксперименты проводились с металлическими сферами, установленными на оси кварцевой трубы (как показано на рис. 1), вдоль которой продувался воздух. Ток инжектируемого пучка варьировался в диапазоне 0,5–1,5 мА, а давление газа в канале поддерживалось постоянным $P_m = 1,6$ Торр. Из данных, приведенных в таблице для расхода газа через канал $G = 2$ л/мин ($w \approx 10$ м/с), следует, что при всех токах пучка потенциал сферы в потоке плазмы примерно в 2 раза ниже, чем потенциал сферы в неподвижном плазменном облаке. Обнаруженный эффект требует специального исследования и объяснения, поскольку он может оказаться весьма важным при проектировании плазмотехнических систем проточного типа.

Т а б л и ц а 3

Влияние обдува сферы ($d = 9$ мм) потоком электронно-пучковой плазмы воздуха, на ее электростатическую зарядку в канале $D = 22$ мм, $P_m = 1.6$ Торр

G (л/мин)	P_m (Торр)	I_b (мА)	ΔU (В)
0	1.6	0.5	14
0	1.6	1	24
0	1.6	1.5	32
2	1.6	0.5	8
2	1.6	1	10
2	1.6	1.5	14

5. Выводы

1. Экспериментально исследована электростатическая зарядка макроскопических тел в плазме различных газов, возбуждаемой электронным пучком внутри диэлектрического контейнера.

2. Получены зависимости, характеризующие влияние условий генерации плазмы на величину потенциала U металлической сферы (мишени), находящейся в диэлектрической трубке, вдоль которой инжектируется тонкий непрерывный электронный пучок. При этом установлено, что на величину потенциала существенным образом влияют

- давление плазмообразующего газа;

- сила тока пучка;
- расстояние между мишенью и точкой инжекции пучка.

3. Нагрев мишени приводит к некоторому (незначительному) повышению величины потенциала мишени U по сравнению с потенциалом холодной мишени.

4. Аналогичные результаты получены и для мишеней в виде диска. Для таких мишеней было выявлено влияние угла φ между осью инжекции пучка и плоскостью диска на величину потенциала U . При нормальном падении пучка потенциал U оказывался на порядок выше, чем при скользящем падении пучка.

5. Выводы 2–4 качественно справедливы для всех газов, использовавшихся в наших экспериментах (воздух, кислород, гелий), однако количественные эффекты для разных газов оказались различными.

6. Установлено, что обдув потоком электронно-пучковой плазмы существенно влияет на электростатическую зарядку твердого тела: при прочих равных условиях потенциал тела в плазменном потоке значительно ниже, чем в неподвижном плазменном облаке.

Работа поддержана РФФИ, грантами 20-02-00501 и Аспирант № 19-38-90009.

Литература

1. *Buhler C.R., Clements J.S., Calle C.I.* 2012 Electrostatics studies for the 2008 Hubble Repair Mission // Proc. 2012 Joint Electrostatics Conf. Cambridge, ON.
2. *Hanna R., Paulmier T., Molinie P., Belhaj M., Dirassen B., Payan D., Balcon N.* Radiation induced conductivity in space dielectric materials // J. Appl. Phys. 2014. N 115. P. 033713.
3. *Бабкин Г.В., Беседина Т.В., Божко И.Д., Морозов Е.П., Савичев В.В. [и др.]*. Электризация высокоорбитальных космических аппаратов // Обзор по материалам зарубежной печати под ред. доктора технических наук С.Д. Гришина. ЦНИИМАШ, 1985. Сер. 11, № 28.
4. *Йе Хлаинг Хтун, Аунг Чжо У, Васильев М.Н.* Генерация приповерхностной электронно-пучковой плазмы // VIII Международный симпозиум по теоретической и прикладной плазмохимии. 10–15 сентября 2018 г., Иваново, Россия. Сборник трудов. С. 154–156.

References

1. *Buhler C.R., Clements J.S., Calle C.I.* 2012 Electrostatics studies for the 2008 Hubble Repair Mission. Proc. 2012 Joint Electrostatics Conf. Cambridge, ON.
2. *Hanna R., Paulmier T., Molinie P., Belhaj M., Dirassen B., Payan D., Balcon N.* Radiation induced conductivity in space dielectric materials. J. Appl. Phys. 2014. N 115. P. 033713.
3. *Babkin G.V., Besedina T.V., Bozhko I.D., Morozov E.P., Savichev V.V., et al.*, Electrization of high-orbit spacecraft. Review based on the materials of foreign press, edited by S.D. Grishin. TsNIIMASH, 1985. Ser. 11, N 28.
4. *Ye Hlaing Htun, Aung Kyaw Oo, Vasiliev M.N.* Generation of near-surface electron-beam plasma. VIII International Symposium on Theoretical and Applied Plasma Chemistry. September 10-15, 2018, Ivanovo, Russia Proceedings. P. 154–156.

Поступила в редакцию 21.12.2020