

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООВОГО СОСТОЯНИЯ УЛОВИТЕЛЯ ПОТОКА ОТ ПЛАЗМЕННОГО ДВИГАТЕЛЯ

### SIMULATION OF THERMAL STATE OF THE BEAM TRAP FROM A PLASMA THRUSTER

А.А. Моисеев<sup>1</sup>, А.А. Филатов<sup>1</sup>, А.К.Горденко<sup>1</sup>, Д.Е.Алфимов<sup>1</sup>, П.Г. Смирнов<sup>1,2</sup> /  
petr.s.8314@mail.ru

A.A.Moiseev, A.A.Filatov, A.K.Gordenko, D.E.Alfimof, P.G.Smirnov

<sup>1</sup> ООО «НПО Гелиосфера»

<sup>2</sup> БГТУ «Военмех»

*В работе рассматривается численное моделирование распределения тепловой нагрузки от потока частиц на поверхности приемника плазменного потока и давления в вакуумной камере. Источником частиц является плазменный двигатель, работающий в импульсно-периодическом режиме. Для моделирования используется метод трассировки частиц.*

*The paper considers the numerical simulation of the distribution of the heat load from the particle flux on the surface of the plasma flux receiver and the pressure in the vacuum chamber. The source of particles is a plasma engine operating in a pulse-periodic mode. Particle tracing method is used for simulation.*

*Ключевые слова: разреженные газы, ловушка частиц, трассировка частиц*

*Key words: rarified gases, beam trap, particles tracking*

Перспективным видом ракетных двигателей для перемещения в космическом пространстве являются электрические ракетные двигатели (ЭРД), которые преобразуют электрическую энергию в кинетическую энергию частиц. Такие двигатели могут работать только в условиях вакуума, поэтому для их испытаний на Земле требуются специальные вакуумные стенды. Так как в процессе работы двигателя в пространство стенда поступает рабочее тело, то их необходимо постоянно откачивать криогенными вакуумными насосами. Так же энергия частиц на выходе ЭРД составляет ~50 эВ, что требует организации средств улавливания потока для предотвращения повреждения конструкции вакуумной камеры для испытаний.

В настоящей работе рассмотрено численное моделирование вакуумной камеры при импульсно-периодической работе ЭРД с целью получить давление в камере при выходе на квазистационарный режим работы и распределение теплового потока на поверхности плазменной ловушки.

Моделирование потока рабочего тела от ЭРД производится методом трассировки частиц.

В вакуумной камере расположены двигатель диаметром 300 мм, 15 криогенных насосов диаметром 900 мм и плазмоуловитель, представляющий собой систему конусов. Двигатель, работающий в импульсно-периодическом режиме с частотой 10 Гц, выпускает 1 млн. частиц, частицы – нейтральный водород. Вероятность захвата частиц для насосов 40%.

Давление в вакуумной камере оценивается из уравнения состояния  $P = \frac{2n}{3V} E_p$ , где  $n$  – количество частиц в исследуемом объеме,  $V$  – объем камеры (или части объема),  $E_p$  – среднестатистическая энергия свободных («незамороженных») частиц в исследуемом объеме. В результате получаем изменение давления в камере в течение времени. Как видно

на рис.3 давление выходит на квазистационарный режим через 0,5 секунды работы двигателя.

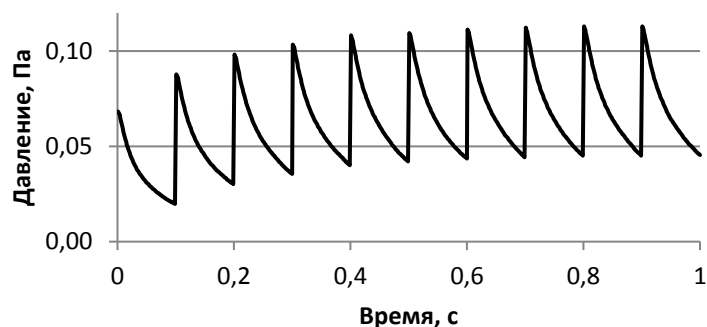


Рис.1. Изменение давления в вакуумной камере в течение нескольких импульсов.

Взаимодействие частиц с поверхностью описывается через тепловой коэффициент аккомодации, который в свою очередь зависит от угла падения на поверхность и энергии частицы (Рис.2). Коэффициент аккомодации является сугубо экспериментальной величиной. Данные по тепловой аккомодации частиц  $Ag^+$  падающих на медную поверхность как функция угла падения и энергии частиц [1].

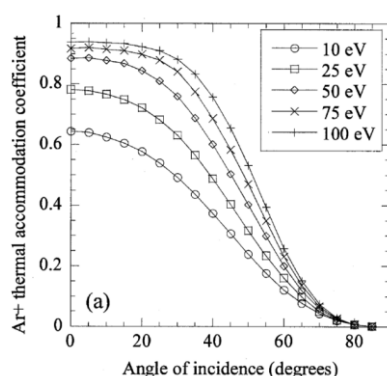


Рис.2. Коэффициент тепловой аккомодации частиц.

Легкие ионы  $He^+$ ,  $H^+$  при энергиях частиц  $\sim 50$  эВ эффективно проникают в поверхность материала на глубину до 10 атомных слоев [2]. Значения коэффициента аккомодации в таком случае должен сильно возрасти.

Энергия частицы  $E_p = \frac{m_p U_p^2}{2}$ , где  $m_p$  – масса частицы,  $U_p$  – скорость частицы. При столкновении с поверхностью, частица отдаст энергию  $E_{acc}$ , уменьшит свою скорость и изменит направление с вероятностью 50 % на 50% или произвольно или зеркально. Поглощенная энергия поверхностью  $E_{ac} = \frac{m_p U_p^2}{2} * a_c$ , где  $a_c$  – коэффициент аккомодации. Скорость отскочившей частицы после передачи энергии  $U_r = U_p * (1 - \sqrt{a_c})$ . Таким образом, переданную поверхности энергию, накопленную в течение времени, можно рассматривать как тепловую нагрузку от потока частиц (рис.3).

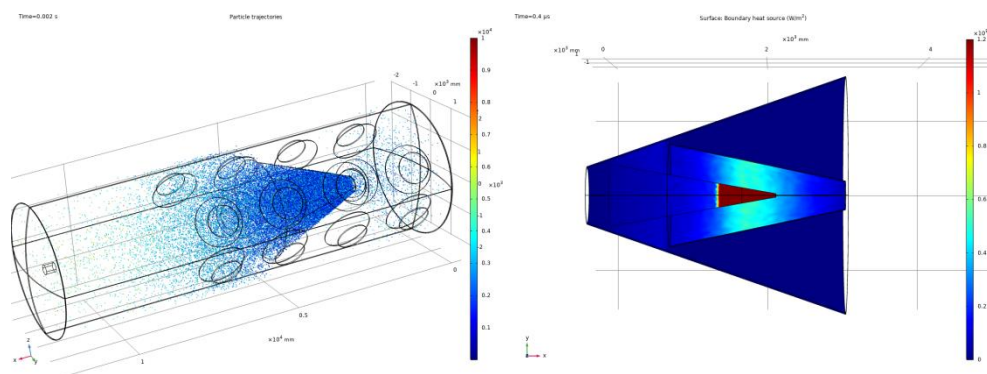


Рис.3. а) распределение частиц через 2 мс после начала работы двигателя. б) распределение теплового потока от частиц.

При захвате частиц насосом они остаются на поверхности, сохраняя свою энергию. Исходя из суммарной энергии «замороженных» частиц оценивается тепловая нагрузка на криогенные насосы.

Распределение теплового потока по поверхности используется в качестве граничного условия при проектировании системы охлаждения уловителя потока.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Описанный в настоящей работе подход к моделированию взаимодействия потока частиц и объектов вакуумной камеры помогает правильно сконструировать геометрию плазموловителя для отведения тепла и защиты крионасосов для безотказной работы в течение длительных испытаний плазменных двигателей.

## ЛИТЕРАТУРА

1. X.-Y. Liu, M.S. Daw, J.D. Kress; «Ion solid surface interactions in ionized copper physical vapor deposition»; Thin Solid Films 422 (2002) 141–149
2. И.И. Шкарбан, Энергообмен между потоками ионов и поверхностями конструкционных материалов., Учебное пособие – М.: Изд-во МАИ, 1994. – 44 с.: ил.