

Общий отказ от ответственности

Одно или несколько из следующих заявлений могут повлиять на этот документ

- Этот документ был воспроизведен с лучшей копии, предоставленной организационным источником. Он публикуется в интересах предоставления как можно большего объема информации.
- Этот документ может содержать данные, превышающие параметры листа. В таком виде он был предоставлен организационным источником и является лучшей из имеющихся копий.
- Данный документ может содержать тоновые или цветные графики, диаграммы и/или рисунки, воспроизведенные в черно-белом варианте.
- Этот документ снабжен страницами в том виде, в каком он был представлен .
- Из-за исторического характера материалов часть этого документа не полностью читаема. Тем не менее, это лучшее воспроизведение из имеющихся оригиналов.

Электродинамический пылезащитный экран для исследований поверхности Луны и Марса

C.I. Calle , C.D. Immer², J.S. Clements³, A. Chen⁴, C.R. BuhleJ, P. Lundeen*,
J.G. Mantovani¹, J.W. Starnes²,
М. Михаленко¹, и М.К. Мазумдер⁵

¹ Лаборатория электростатики и физики поверхности, Космический центр НАСА им. Кеннеди, штат Флорида, 32899

*ASRC Aerospace, Космический центр имени Кеннеди, штат Флорида, 32899

² Физический факультет, Аппалачский государственный университет, Бун, штат Северная Каролина, 28608

³ Физический факультет, Оклахомский баптистский университет, Шоуни, ОК 74804

⁵ Факультет прикладных наук, Университет Арканзаса, Литл-Рок, 72204

Аннотация

Полеты "Аполлона" на Луну показали, что лунная пыль может препятствовать космической деятельности астронавтов из-за своей способности прилипать к большинству поверхностей. Посадочные аппараты и роверы НАСА для исследования Марса также показали, что на Марсе эта проблема не менее, если не более сложная. В этой статье мы сообщаем о наших усилиях по разработке электродинамического пылезащитного экрана для предотвращения накопления пыли на поверхностях и для удаления пыли, уже прилипшей к этим поверхностям.

Технология электродинамического пылезащитного экрана, разработанная в 1970-х годах, показала, что заряженные и незаряженные частицы лигируются и переносятся с помощью электростатических и диэлектрофоретических сил. Эта технология никогда не в космосе на Марсе или Луне из-за опасений электростатического пробоя. В этой статье мы показываем, что соответствующая конструкция может предотвратить электростатический пробой при низком марсианском атмосферном давлении. Мы также можем показать, что незаряженная пыль может быть поднята и удалена с поверхностей в смоделированных марсианских условиях окружающей среды. Эта технология имеет множество потенциальных преимуществ для удаления пыли с козырьков, смотровых окон и многих других поверхностей, а также с солнечных батарей. Нам также удалось разработать версию электродинамического пылезащитного экрана, работающего в условиях жесткого вакуума. Эта версия должна хорошо работать на Луне.

Введение

Беспилотные полеты на Марс и высадка человека на Луну продемонстрировали, что пылевая опасность представляет собой серьезную угрозу для будущего освоения космоса человеком. Два семинара по борьбе с пылью, проведенные в 2005 году под эгидой НАСА, пришли к выводу, что разработка эффективных решений по борьбе с пылью необходима для того, чтобы (1) защитить от скопления пыли все критически важное оборудование миссии, включая солнечные панели, порты для приборов и камер, оптические зеркала и роботизированные манипуляторы, (2) минимизировать риск для жизни, связанный с вдыханием и проглатыванием токсичной пыли, которая может загрязнить воздух и воду в кабине экипажа, и (3) уменьшить загрязнение костюмов для внекорабельной деятельности (EVA), которые в противном случае будут покрыты и серьезно затруднят или сделают неработоспособными из-за постоянного воздействия пыли.

Развитие высокоэффективных солнечных панелей и острая необходимость в возобновляемых источниках энергии на Земле, вероятно, приведут к расширению их применения в тех областях, где солнечный свет в изобилии в течение всего года, а собранная энергия доступна для потребителей. Одной из таких возможных областей применения станет установка недорогих солнечных панелей вдоль автомагистралей и подключение вырабатываемой энергии к энергосетям.

В настоящее время на национальных автомагистралях солнечная энергия используется в качестве переносного источника энергии. Для низких

Для поддержания работоспособности этих панелей требуется защита от осаждения дорожной пыли, **особенно в полусухих районах**, таких как штат **Аризона**. Во многих местах естественная этих панелей дождями может быть слишком редкой, и эффективность преобразования энергии может снизиться из-за чрезмерного осаждения пыли на поверхности панелей. Лабораторные эксперименты показывают, что всего один миллиграмм ($1,0 \text{ мг/см}^2$) пыли, осевшей на квадратный сантиметр ($1,0 \text{ мг/см}^2$), может снизить выходную мощность более чем на 90 процентов.

Здесь сообщается о разработке прозрачного, гибкого электродинамического экрана (ЭДЭ) для его применения с целью предотвращения значительного затемнения солнечных панелей. Лабораторные эксперименты проводятся с использованием имитатора пыли JSC Mars-1, а оценки выполняются в лабораторных условиях окружающей среды при одной атмосфере для земных приложений и при низком давлении с целью имитации окружающей атмосферы Марса. Приведенный ниже анализ показывает, насколько эффективно экран служит для удаления частиц пыли диаметром менее 50 нм с электростатическим зарядом, изменяющимся от нуля до насыщенного уровня поверхностного заряда, и с различным электрическим сопротивлением от проводящих до высокоомных материалов. Экспериментальные исследования, представленные здесь, сосредоточены на эффективности удаления пыли испытываемыми экранами в зависимости от размера и распределения заряда частиц пыли при однофазном и трехфазном возбуждении, а также на требованиях к мощности для каждой операции удаления пыли.

Удаление частиц пыли

Большинство взвешенных в воздухе частиц диаметром менее 50 нм различные физические свойства и химический состав. В наших экспериментах мы выбрали стимуляторы марсианской пыли, которые в основном представляют собой вулканическую пыль с составом, наиболее вероятным для присутствия на поверхности Марса. Образцы пылин-симулятора были получены из Космического центра Джонсона (JSC) и Лаборатории реактивного движения (JPL). Образцы пыли состоят из SiO_2

На рисунке 1 показаны основные принципы работы электродинамического экрана. В данном случае показан свободный экран без диэлектрической пленки. Электроды могут быть запитаны как от однофазного, так и от трехфазного переменного.



Рис. 1 (слева) Однофазная электрическая завеса. (справа) Трехфазная электрическая завеса [Masuda 1971]. На эскизе показано свободное расположение экрана электрической завесы.

Однофазное возбуждение создает стоячую волну между электродами, а трехфазное - бегущую волну. Последний вариант предпочтительнее, поскольку бегущая

Волна имеет сильную трансляционную составляющую, которая быстро перемещает частицы пыли от одного конца экранов к другому.

Стоячая волна, возникающая при однофазном возбуждении, также хорошо удаляет частицы с экрана, хотя и не так эффективно, как трехфазная. Стоячую волну можно рассматривать как суперпозицию двух бегущих волн, движущихся в противоположных направлениях. Таким образом, любая асимметрия или возмущение в электрическом поле переменного тока, наличие гармоник в приложенном поле и любое воздушное течение на верхней поверхности экрана создают скорость дрейфа для перемещения левитирующих частиц пыли от поверхности к удалению от экрана. Примером воздушного течения является наличие ветра на поверхности Марса.

Общее уравнение движения отталкиваемых и перемещаемых заряженных частиц можно представить в виде [1-5].

$$m \frac{dV_p(\vec{r}, t)}{dt} + 6\pi\eta r V_p(\vec{r}, t) = qE_0(\vec{r}) \cos \omega t + F_{ext} \quad (1)$$

где, m - масса частицы, $V(r, t)$ - скорость частицы, η - вязкость газобразная среда, r - радиус частицы, q - электростатический заряд на частице, $E(r) \cos \omega t$ - приложенное электрическое поле угловой частоты ω , а F_{ext} - внешние силы, например, гравитация. В приведенном выше уравнении \vec{r} представляет собой координаты (x,y,z), в то время как r используется для обозначения радиуса частицы.

Электрический поток $E(x,y,z,t)$ и результирующее положение заряженной частицы (x, y, z, t) связаны сложным образом. Масуда, который впервые ввел понятие электрической завесы [2], решил это уравнение с помощью приближений, и его моделирование хорошо согласуется с экспериментальными данными. В следующем разделе мы представим аналитическое решение траекторий частиц с упрощающими предположениями. В приведенном выше уравнении мы предположили наличие начального электростатического заряда $+q$ на частице. Однако и теоретический анализ, и экспериментальные данные показывают, что и заряженные, и незаряженные частицы удаляются с поверхности экрана. Если частица без начального заряда ($q=0$) оседает на поверхность экрана, то вскоре она приобретает чистый электростатический заряд либо за счет поляризации заряда (диэлектрофорез) внутри диэлектрической частицы, либо за счет индукционного заряда на проводящей частице; оба процесса вызывают чистую силу на частице, что приводит к движению частицы по поверхности полимера. Любое движение диэлектрической частицы приводит к трибоэлектризации. Чистый заряд, приобретенный частицей либо в результате диэлектрической трибоэлектризации, либо в результате индукции, приводит к ее удалению с поверхности экрана. Тогда становится применимым уравнение (1).

В большинстве случаев частицы, приближающиеся к поверхности электродинамического экрана, будут иметь значительный электростатический заряд, поскольку частицы порошка в атмосфере, скорее всего, будут трибоэлектрически заряжены в процессе их рассеивания. На поверхности Марса и Луны частицы пыли, скорее всего, будут сильно заряжены. Независимо от процесса зарядки, общий заряд на отдельных частицах пропорционален площади поверхности частицы; кулоновская сила отталкивания будет равна

$$F = -qE, \quad (2)$$

где, $q = cr_s 4\pi^2 C$, и a_s - поверхностная плотность заряда, а q - суммарный заряд в кулонах (C). Если предположить, что частицы заряжены до уровня насыщения, то

$$q \approx 4\pi^2 \times 2,64 \times 10^6 C, \quad (3)$$

где коэффициент $2,64 \times 10^6 C/m^2$ принимается за максимальную плотность поверхностного заряда

сферической частицы до электрического пробоя при атмосферном давлении.

Максимальное электрическое поле, создаваемое на поверхности сферической частицы с зарядом q , превышает напряжение пробоя при атмосферном давлении Земли (≈ 1000 мВ), на заряженной частице возникает коронный разряд, который ограничивает максимальную поверхностную плотность заряда. Этот же процесс ограничивает максимальную плотность заряда марсианской пыли при атмосферном давлении Марса. Максимальная сила отталкивания при

тогда

$$F_{e(\max)} = q_{\max} E_{\max} = K_{\max} r^2 \quad (4)$$

где E_g принимается равным 5×10^5 В/м для безопасной работы ниже электрического поля пробоя при атмосферном давлении, а K_g - постоянная при данном давлении окружающей среды. При атмосферном давлении $K_{\max} = 112,9$. Максимальный предел электрического поля, которое может быть приложено на поверхности Марса, обсуждается позже. Когда частица с зарядом насыщения приближается к экрану и оказывается вблизи поверхности, она испытывает электрическое поле, как показано на рис. 1. Скорость, которую приобретает частица в момент $E(t)$ - можно оценить, если предположить, что движение частицы будет подчиняться закону Стокса. При таких предположениях максимальная скорость частицы в устойчивом состоянии будет иметь место, когда сопротивление сопротивления будет равно движущей силе,

$$6 \quad r p(I_{\max}) = 2,64 \times 10^6 \times 4\pi^2 \times 5 \times 10^6. \quad (5)$$

Для воздуха $q = 1,8 \times 10^{-18}$ Н с/м², таким образом, максимальная скорость пропорциональна радиусу частицы,

$$v.(=a-) = \frac{2,64 \times 10^6 \times 4\pi^2 \times 5 \times 10^6}{6 \quad r}$$

$$V_p (\max.) = 4,88 \times 10^6 \times r$$

Таким образом, в целом,

$$V = K_g r \quad (6)$$

Например, при $r = 1 \mu m$, $V = 500$ см/с, а когда $r = 100 \mu m$, $V = 50$ м/с.

Заряженная частица приобретает свою установившуюся скорость за время, равное примерно $3T_p$, где T_p - время аэродинамической релаксации частицы. При атмосферное давление на Земле, $z_g = 13 \mu s$ для $r = 1 \mu m$, и $T_p = 30$ мс для $r = 50 \mu m$. аэродинамического диаметра частицы $50 \mu m$ значение $3T_p$ составляет 90 мс. Период времени (Т) электродинамического возбуждения, подаваемого на электроды EDS, определяется из диапазона значений $3/r$ для удаляемых частиц.

Схема размещения ЭОП над солнечной панелью показана на рис. 2. Здесь экран состоит из параллельных прозрачных проводящих электродов, вмонтированных в верхнюю поверхность прозрачной диэлектрической пленки, размещенной над солнечными панелями для очистки от пыли. На сайте

Экраны могут быть размещены непосредственно над солнечной панелью или на небольшом расстоянии от поверхности, покрывающей панель. Если электроды встроены в тонкую диэлектрическую пленку, то пленка служит как физической защитой от механического воздействия и истирания частицами пыли, особенно во время пыльной бури, так и электродинамическим пылезащитным экраном для минимизации затемнения падающего оптического излучения. Диэлектрическая пленка также служит средством для зарядки неизменных частиц, что делает экран эффективным как против заряженной, так и против незаряженной пыли.

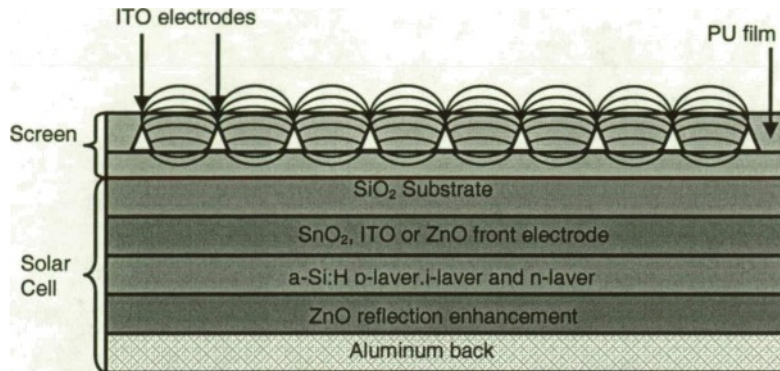


Рис. 2. Прозрачный электродинамический экран, встроенный в прозрачную пленку, размещен над солнечной панелью. Электроды из оксида индия-олова (ITO) имеют треугольное сечение, что более равномерное распределение электрического поля, чем при использовании электродов прямоугольного .

Траектории заряженных частиц в приложениях электродинамических экранов

Здесь представлена упрощенная модель положений и траекторий дрейфовых заряженных частиц, управляемых напряжениями бегущей или стоячей волны на электродинамическом экране. В анализе пренебрегается эффектом инерции частиц и предполагается, что собственное поле от частиц намного меньше, чем наложенное поле от напряжения бегущей или стоячей волны. Бегущая волна генерируется при применении трехфазной электродной системы, встроенной в экран, в то время как стоячая волна формируется при использовании однофазной электродной системы (рис. 1). Представлены репрезентативные результаты для различных начальных положений частиц и частот приложенного напряжения.

Электрический гуральн *Traveling Wave*

Решения для электрического поля

На рисунке 3 показана двумерная геометрия потенциала бегущей волны в точке $x = -d$.

$$v(z = -d, z, t) = P_0 \cos(n\tau - kz) \quad (7)$$

покрыта диэлектрическим слоем с потерями толщиной d , проницаемостью ϵ и проводимостью w . Область для $x > 0$ принимается за свободное пространство с проницаемостью s . Предполагается, что система имеет бесконечную протяженность в направлении y и не имеет зависимости поля от координаты y .

При отсутствии значительного объемного заряда в двух областях $-d < x < 0$ и $x > 0$ - управляющим уравнением является уравнение Лапласа в обеих областях, $\nabla^2 \Phi(z, x) = 0$. Необходимыми граничными условиями являются

$$\Phi(x = -d, z, t) = \Phi(x = 0, z, t) = V, \cos(n\pi z) \quad (8)$$

$$\Phi(x = 0+, z, t) = \Phi(x = 0-, z, t)$$

$$\epsilon_0 \frac{\partial E_x(x = 0+, z, t)}{\partial t} = \epsilon \frac{\partial E_x(x = 0-, z, t)}{\partial t} + w E(x = 0-, z, t) \quad (8)$$

Удобно ввести комплексные амплитудные обозначения, чтобы скалярный электрический потенциал можно было записать в виде

$$\Phi(x, z, t) = \operatorname{Re} [\Phi(x) e^{j\omega t}] \quad (9)$$

Решение будет таким

$$\Phi(x) = \begin{cases} \frac{-V \sinh lx + F, \sinh k(x+d)}{\sinh H \sinh H} & -d \leq x \leq 0 \\ \hat{V}_1 e^{-kx} & x \geq 0 \end{cases} \quad (10)$$

где k - комплексный амплитудный потенциал при $x = 0$.

$$\hat{V}_1 = \frac{(w + jmc)V_0}{\sinh H \left[j E_0 - F(j\omega E - F w) \coth H \right]} \quad (11)$$

Величина и фаза $k = V_0 e^{j\theta}$ являются

$$V_1 = V_0 \frac{2(l'm' + tr^2)}{(r' - r)^2 + ((r^2 + e) m^2 + w^2) \cosh 2lf + 2se m^2 \sinh 2lf} \quad (12)$$

$$Q = \tan^{-1} \left[\frac{me w \sinh H}{(m^2 s^2 - i - w') \cosh H + s f, m^2 \sinh R d} \right] \quad (13)$$

Заметим, что если $w = 0$

$$V_1 = \frac{\epsilon V_0}{[\epsilon \cosh kd + \epsilon_0 \sinh kd]}, \quad Q = 0 \quad (14)$$

Тогда комплексное амплитудное электрическое поле в каждой области имеет вид

$$\hat{E}_x = \frac{d}{dx} \begin{cases} \frac{k[V \cosh R \cdot \sinh k(-d)]}{\sinh H} & -d \leq x \leq 0 \\ kV_0 e^{-kx} & x \geq 0 \end{cases} \quad (15)$$

$$\hat{E}_z = jk\hat{\Phi}$$

Таким образом, электрическое поле для $x > 0$ имеет вид

$$I \rightarrow \operatorname{Re}[(E_0 + E_1) e^{i(nz - kt - \phi)}] \quad (16)$$

$$-kV \cos(nz - kt - \phi) - \sin(nz - kt - \phi) e^{i\phi}$$

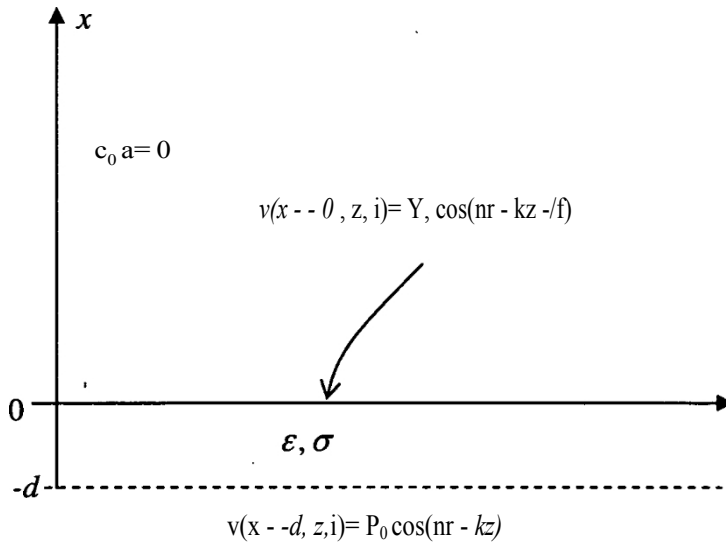


Рис. 3. Бегущая волна потенциала приложена в точке $z = -d$. Диэлектрический слой с потерями толщиной d , проницаемостью ϵ и проводимостью σ препятствует проникновению заряженной пыли в область $z < 0$. Поверхность $z = 0$ имеет уменьшенную величину потенциала ($I_1 < V$) и запаздывающую фазу // по отношению к движущему потенциалу $x \rightarrow -d$.

Траектории заряженных частиц для $x > 0$

Теперь мы предположим, что заряженные частицы, каждая с общим зарядом q и радиусом r , первоначально равномерно распределены для $x > 0$ и что их собственное поле очень мало по сравнению с полем из (16). Мы также предполагаем, что кулоновская сила на частицах им скорость дрейфа, которой противостоит вязкое сопротивление Стокса, где среда для $x > 0$ имеет вязкость

$$6\pi\eta Rv = qE \quad (17)$$

Тогда подвижность частицы

$$g = v/E = \frac{q}{6\pi\eta R} \quad (18)$$

Если пренебречь инерцией частицы, то компоненты движения частицы по осям x и z будут иметь вид

$$v_x = \frac{dx}{dt} = \mu E, \quad -pkV \cos(nz - kt - \phi) e^{i\phi} \quad (19)$$

$$v_z = \frac{dz}{dt} = \mu E, \quad -ykY_1 \sin(nz - kt - \phi) e^{i\phi} \quad (20)$$

Мы определяем новую переменную

$$ku = \omega t - kz - \beta m \frac{\partial u}{\partial t} = -\frac{m}{k} \frac{dz}{dt} \quad (21)$$

Таким образом, (19) и (20) можно переписать в виде

$$\frac{du}{dt} = \frac{ai}{k} + ykV, \sin ku e^{*''} \quad (22)$$

$$ykV, \cos ku e^{\circ'} \quad (23)$$

Удобно безразмерные (21)-(23) определить безразмерными переменными

$$x \rightarrow kx, k \rightarrow kz, u \rightarrow ku \rightarrow mt - kz - fl, \quad \tilde{u} = \frac{\omega}{ykV}, \quad (24)$$

давать доход

$$\frac{d\tilde{u}}{d\tilde{t}} = \cos \tilde{u} e^{\circ''!} \quad (25)$$

$$\frac{\partial y}{\partial t} = \tilde{\omega} + \sin \tilde{u} e^{-\tilde{x}} \quad (26)$$

Если взять соотношение (25) и (26), то получится обыкновенное дифференциальное уравнение, явно не зависящее от F

$$\frac{d\tilde{u}}{d\tilde{t}} = \frac{\tilde{\omega} + \sin \tilde{u} e^{-\tilde{x}}}{\cos \tilde{u} e^{-\tilde{x}}} \quad (27)$$

который может быть интегрирован
в

$$\sin u = [N(I - x_0) + \sin u_0 e^{\circ''''\circ}] e^{''!} \quad (28)$$

где координата (x, up) - точка, через которую проходит траектория данного заряда.

ТАБЛИЦА 1: КРИТИЧЕСКИЕ ТОЧКИ J_p при $f_4 = 3s/2$ на МАКСИМУМ ПОЗИЦИИ ПОЛНЦЫ A_y при $f_1 = n/2$ FOR VARIOUS VALUES OF I , $0 < N < 1$.

1	0	1.27846
0.9	0.10536	1.38383
0.8	0.22314	1.50161
0.7	0.35667	1.63514
0.6	0.51083	1.78290
0.5	0.69315	1.97161
0.4	0.91629	2.19476
0.3	1.20397	2.48244
0.2	1.60944	2.88790
0.1	2.30259	3.58105
0.01	4.60517	5.88363
0.001	6.90776	8.18622

Критические точки

Критические траектории разделяют различные режимы движения частиц. Эти критические траектории проходят через критические точки, в которых $di/dt \rightarrow 0$ и $du/dt \rightarrow 0$. Решение (25) и (26) для этих условий нулевой скорости дает решения в виде

$$\tilde{u}_c = \frac{3\pi}{\omega}; \quad \tilde{x}_c = -\ln \tilde{\omega} \quad (29)$$

где без потери общности мы рассматриваем только $\omega > 0$. Заметим, что поскольку $x > 0$, критические точки могут возникать только при $0 < n < 1$.

В таблице 1 приведены некоторые значения x , а также максимальное положение x_p при $u \rightarrow \pi/2$, которое заряд может преодолеть из $x \rightarrow 0$ через критическую точку.

Обратите внимание, что значения x и x_p увеличиваются с уменьшением N .

Заряд, первоначально находящийся вне критической траектории, не может достичь поверхности $x = 0$. Заряд, первоначально находящийся на поверхности $x = 0$, движется синхронно с бегущей волной напряжения, в пределах огибающей траектории заряда, проходящей через критическую точку

$$(x \rightarrow x, u \rightarrow 3s/2). \quad (2).$$

Стоячая волна Элеофртк Курфиафн

Решения для электрического поля

Теперь заменим напряжение бегущей волны при $z=0$ на рисунке 3 на стоячую волну $v(z=$

$$-d, z, r) = Y \cos nrcos Hz$$

(30)

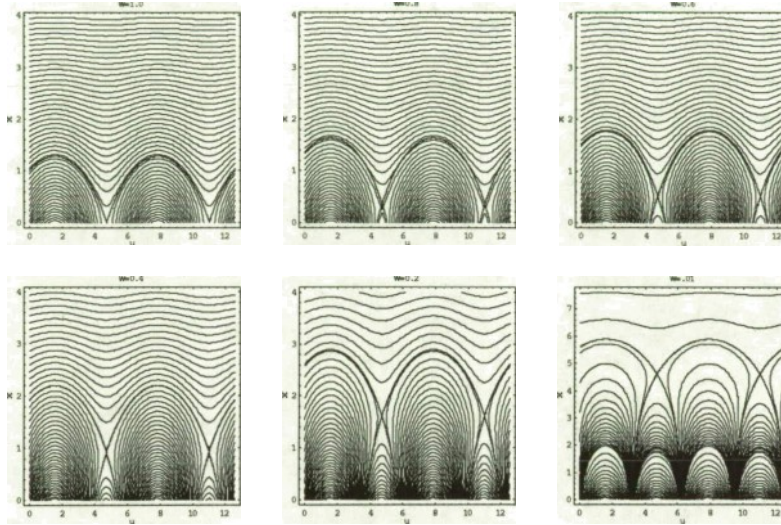


Рис. 4. Траектории безразмерных зарядов в пространстве (x, z) для различных значений n , для $0 < n/f_1$, для напряжения бегущей волны, заданного (7). Обратите внимание на критические траектории разделения, проходящие через точку $(x = x^*, z = z^*) = (3s/2)$, которая разделяет области заряженных частиц. На

Максимальное положение заряда, движущегося от $x = 0$, происходит в точке $(x^* = x^*, z = a/2)$. Значения x^* и z^* для различных T приведены в таблице 1.

Тогда решение для скалярного электрического потенциала имеет вид

$$V(z, z, i) = \text{Read}(z) \cos Hz e^{-kz} \quad (31)$$

где $\text{Read}(z)$ имеет тот же вид, что и (10). Граничные условия по-прежнему задаются (8), а потенциал бегущей волны при $z = -d$ заменяется (30). Тогда решения (11)-(14) здесь справедливы, и электрическое поле для $z > 0$ имеет вид

$$\vec{E} = kV_1 \cos(\omega t - \beta) \left[\cos kz \vec{i}_x + \sin kz \vec{i}_z \right] e^{-kz} \quad (32)$$

Траектории заряженных частиц

Аналогичные уравнения переноса заряда для (19) и (20) имеют вид

$$v_x = \frac{dx}{dt} = \mu E_x = \mu k V_1 \cos(\omega t - \beta) \cos kz e^{-kz} \quad (33)$$

$$v_z = \frac{dz}{dt} = \mu E_z = \mu k V_1 \cos(\omega t - \beta) \sin kz e^{-kz} \quad (34)$$

Введем безразмерные переменные

$$\tilde{t} = \omega t - \beta, \quad \tilde{x} = kx, \quad \tilde{z} = kz, \quad \tilde{\omega} = \frac{\omega}{\mu V_1 k^2} \quad (35)$$

сводит (33) и (34) к

$$\frac{d\tilde{x}}{d\tilde{t}} = \frac{\cos \tilde{t} \cos \tilde{z} e^{-\tilde{x}}}{\tilde{\omega}} \quad (36)$$

$$\frac{d\tilde{z}}{d\tilde{t}} = \frac{\cos \tilde{t} \sin \tilde{z} e^{-\tilde{x}}}{\tilde{\omega}} \quad (37)$$

Чтобы решить (36) и (37), свяжем их через общий множитель

$$\frac{\cos \tilde{t} e^{-\tilde{x}}}{\tilde{\omega}} = \frac{1}{\cos \tilde{z}} \frac{d\tilde{x}}{d\tilde{t}} = \frac{1}{\sin \tilde{z}} \frac{d\tilde{z}}{d\tilde{t}} \quad (38)$$

Исключение dJ дает

$$\frac{d\tilde{x}}{d\tilde{t}} = \cot \tilde{z} \quad (39)$$

с решением

$$\sin \tilde{z} = e^{\tilde{x}} \sin z_0 \quad (40)$$

где x и z — начальные координаты частицы в точке $F=0$.

Подставив (40) в (37)

$$\frac{d\tilde{z}}{d\tilde{t}} = \frac{\cos \tilde{t}}{\tilde{\omega}} \sin z_0 e^{\tilde{x}} \quad (41)$$

позволяет решить задачу

$\tilde{z}(F)$

$$\tilde{z}(\tilde{t}) = \frac{\sin F \sin z_0}{\tilde{\omega}} e^{-\tilde{x}_0} + \tilde{z}_0 \quad (42)$$

с $x(F)$, полученным из (34) как

$$I(i) = \ln \left[\frac{\sin z(t)}{\sin z_0} \right] \cdot \tilde{z} \cdot \tilde{z}(\tilde{t}) > 0 \quad (43)$$

Репрезентативные траектории частиц заряда в пространстве (x, z) для различных частот N показаны на рисунке 5. В то время как (40) показывает, что $\tilde{z}(F)$ изменяется чисто синусоидально со временем, (43) показывает, что $x(F)$ имеет нелинейное изменение со временем.

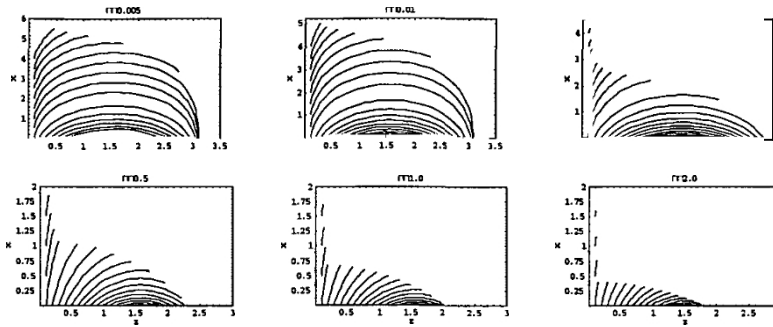


Рисунок 5. Траектории безразмерных зарядов в пространстве (z, z) для различных значений ii при напряжении стоячей волны, заданном в (24).

Приведенный выше анализ показывает, что электродинамический экран, управляемый либо однофазной, либо трехфазной переменного тока, действует как экран, который не позволяет заряженным частицам проникать через барьер электрического поля и оседать на плоскости $x=0$.

Удаление незаряженных частиц

Когда электроды помещены в диэлектрическую пленку и возбуждаются синусоидальными волнами, как показано на рис. 6, 7, 8 и 9, было экспериментально замечено, что как первоначально заряженные, так и неизменные частицы с различным электрическим сопротивлением эффективно удаляются с электродинамического экрана. Процесс удаления первоначально заряженной частицы (q), как показано на рис. 6, был рассмотрен в предыдущем разделе, а для незаряженных диэлектрических частиц этот процесс проиллюстрирован на рис. 7 и 8. На рис. 9 показана индукционная зарядка незаряженной проводящей частицы на электродинамическом экране.

В силу дипольного момента, индуцированного на месте частицы в неоднородном электрическом поле, частица испытывает диэлектрофоретическую силу в градиенте поля [6],

$$F_d \sim \langle P \rangle \cdot \nabla E^2, \quad (44)$$

где P - вектор поляризации, равный p , где $p = qd$ - дипольный момент для каждого отдельного диполя в пределах одной частицы, а n - число диполей.

Для сферической частицы радиуса r и диэлектрической проницаемости ϵ_2 , подвергающейся воздействию градиента поля, выраженного в (44), и находящейся при этом на пленке с диэлектрической проницаемостью ϵ_1 , сила может быть представлена как [7]

$$F_d \sim 2\pi r^3 \frac{\epsilon_2 - \epsilon_1}{\epsilon_2 + \epsilon_1} \nabla |E|^2 \quad (45)$$

Направление поля зависит от знака члена $(\epsilon_2 - \epsilon_1)$. Диэлектрические постоянные частицы и пленки считаются без потерь.

Форма волны приложенного напряжения $V \sin(\omega t)$ при однофазном режиме работы представлена на рисунках 6-9. На рисунке 5 представлен процесс удаления пыли, когда заряженная частица приближается к поверхности экрана. Если $q=0$, частица оседает на поверхности экрана. Как только частица окажется на поверхности, как показано на рис. 6, она приобретет заряд, как объяснялось выше.

Поскольку приложенное дивергентное электрическое поле осциллирует, частица испытывает периодическую силу, величина которой пропорциональна квадрату напряженности поля. Колебания силы притяжения на частице заставляют ее катиться или двигаться вдоль линий градиента поля на поверхности диэлектрика. Эти движения частицы по поверхности полимера приводят к трибоэлектризации, как обсуждалось выше, до значительно высокого уровня заряда, поскольку заряд частицы продолжает увеличиваться по мере того, как движение частицы увеличивается по мере того, как она приобретает дополнительный заряд. Результирующий чистый заряд на частице заставляет частицы отскакивать от экрана. На рис. 7 и 8 показано движение частиц.

Форма волны возбуждающего напряжения $V_0 \sin \omega t$, электрическое поле $E \cos(\omega t)$ и результирующая скорость трехзарядной частицы (принятая за $+q$) приведут к движению частицы $V_p(t) - V_p \cos(\omega t - \phi)$, как показано на рис. 7. Заряженная частица колебания вдоль изогнутых силовых линий между соседними электродами. На рисунке видно, что положительно заряженная частица испытывает две силы отталкивания: касательную к кривым линиям поля и нормальную к кривой траектории. Нормальная составляющая - это центробежная сила, возникающая из-за криволинейного инерционного движения частиц. Эта нормальная составляющая обеспечивает подъемную силу, нормальную к поверхности экрана.

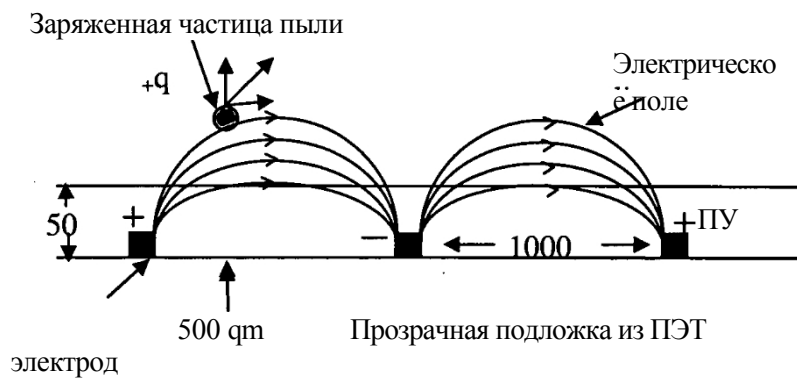


Рис.6. Поперечный разрез электродинамического экрана из гибкой полиэтилентерефталатной (ПЭТФ) пленки толщиной 500 нм, на которую нанесены прозрачные электроды из оксида олова (ITO) прямоугольного сечения (ширина 10 нм, высота 10 нм) с межэлектродным расстоянием 1000 нм. Электроды помещены в полиуретановое (PU) пленочное покрытие толщиной пленки 50 нм. Толщина электродов варьируется от 10 до 100 нм, а межэлектродное расстояние - от 100 до 1000 нм для оптимизации работы ЭОП.

Поскольку частицы колеблются или катятся сначала с небольшой амплитудой, только диэлектрофоретической силой, а затем с возрастающей амплитудой по мере продолжения контактной зарядки из-за сопутствующего трения о поверхность экрана, заряд частиц увеличивается, полярность и величина заряда зависят от разности рабочих функций между двумя контактирующими поверхностями, заряжаемыми в процессе индукционной зарядки. Этот процесс аналогичен зарядке диэлектрических частиц. В целом, зарядка частиц происходит за счет всех этих механизмов в сочетании с вкладом в разной степени в от материалов. В таблице 2 показаны относительные вклады.

Незаряженная проводящая сфера

Процесс электростатического заряда и удаления также работает для проводящих частиц. Частицы, первоначально незаряженные и помещенные на диэлектрический экран, будут силу, обусловленную индуцированным зарядом. Заряд на сферической частице можно приближенно представить следующим образом

как [6] $q \sim \epsilon \Gamma_0^2$

Приведенный выше анализ применим к неорганическим частицам пыли, которые не обладают высокой адгезией к поверхности экрана. В общем случае сила индукции может быть представлена следующим образом

$$F, - E d r^2 \quad (47)$$

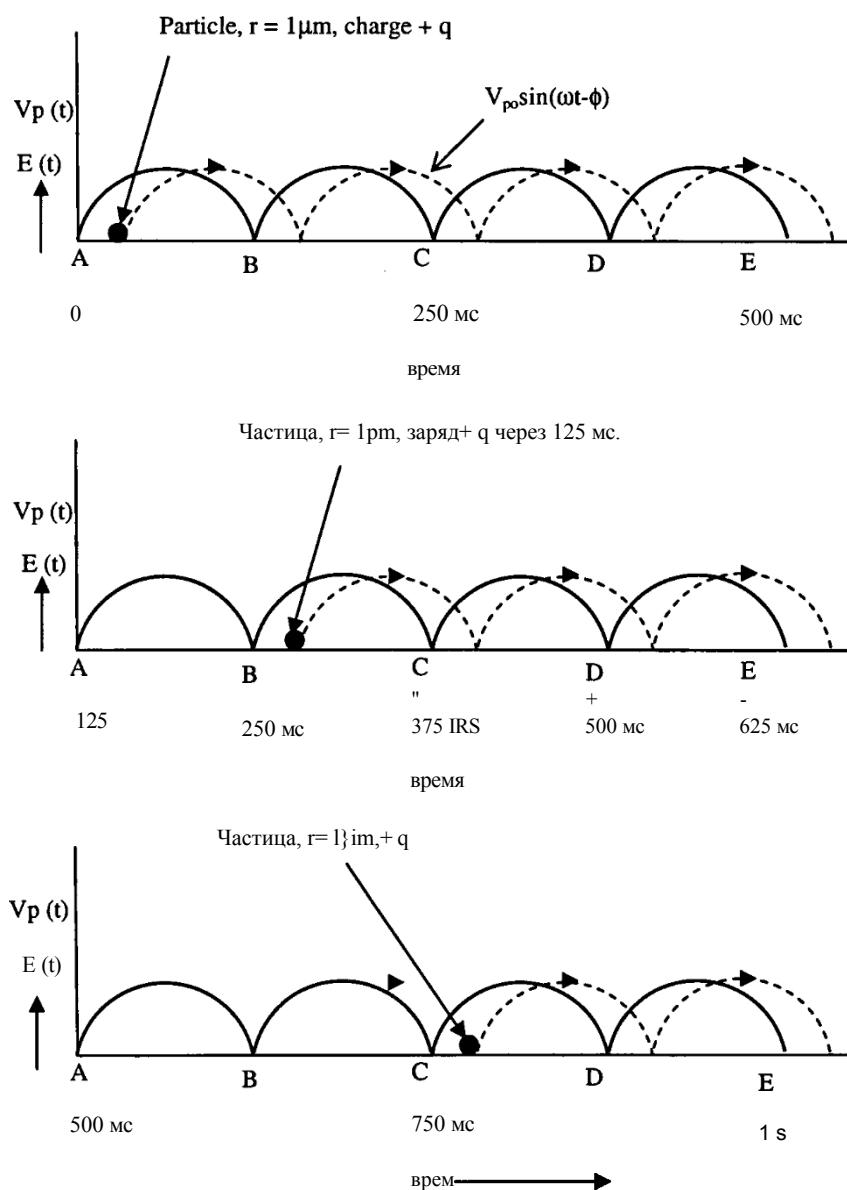


Рис. 7. Заряженная ($+q$) частица диаметром 2 мкм, расположенная в точке А, подвергается переменного электрического поля E , не приложенного между соседними электродами, как показано на рисунке. Положение частицы как функция времени показано в трех временных кадрах, начиная с $t_1=0$ (верхний кадр), $t_2=125$ мс

(средний кадр) и при $t = 500$ мс (нижний кадр) соответственно. Скорость частицы в установившемся состоянии представлена $p q \sin(\omega t - \phi)$, где ϕ - фазовое запаздывание частицы, определяемое $\tan^{-1} \epsilon''/\epsilon'$, где ϵ'' - время аэродинамической релаксации.

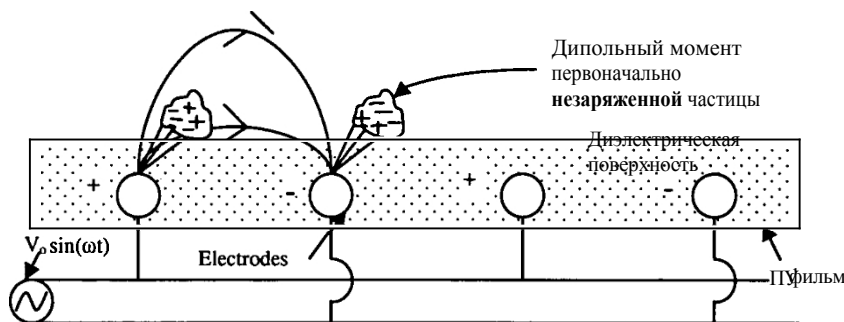


Рис. 8 Незаряженная диэлектрическая частица, попавшая на поверхность диэлектрической пленки, испытывает диэлектрфоретическую силу из-за наведенного дипольного момента частицы приложенным электрическим полем. Поскольку приложенное электрическое поле осциллирует, частица испытывает силу, пропорциональную квадрату градиента поля, движется вдоль линий поля на поверхности диэлектрика и трибоэлектризуется до значительно высокого заряда. Таким образом, изначально незаряженные частицы поляризуются и испытывают диэлектрфоретическую силу, которая создает чистый заряд на частице, что вызывает дополнительную трибоэлектризацию, пока частицы не соскочат с экрана.

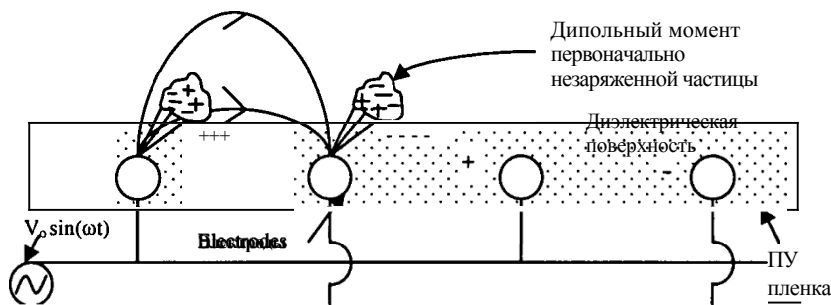


Рис. 9 Индукционная зарядка проводящих и полупроводящих частиц, нанесенных на диэлектрический экран с внедренными электродами 1 и 2 - относительные диэлектрические постоянные экрана и частицы соответственно.

Постоянная времени индукционного заряда частицы, покоящейся на диэлектрическом экране, зависит от проведения заряда, имеющего ту же полярность, и мгновенная полярность электрода от частицы к диэлектрической поверхности экрана. Во многих случаях применения EDS предполагается, что частицы состоят из диэлектрических материалов с потерями, а экраны также значительную поверхностную проводимость для проведения заряда от частиц. Необходимо иметь ограниченное количество поверхностной проводимости, чтобы избежать накопления заряда на поверхности диэлектрического экрана.

ТАБЛИЦА 2. ПРОЦЕССЫ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ЗАРЯДА ДЛЯ ПЕРВОНАЧАЛЬНО НЕЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ, ОСАЖДЕННЫХ НА ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЙ ЭКРАН, ВСТРОЕННЫЙ В ИЗОЛЯЦИОННУЮ ПОЛИМЕРНУЮ ПЛЕНКУ.

Сопротивление частиц	Процессы зарядки	Ограничения
$\rho < 10^8 \text{ км}$	Индукция и Трибоэлектричество	Поверхность пленки удельное сопротивление высокий; Высокая влажность; $R < 0,5 \text{ км}$; & Низкое электричество Поле.
$10^9 \text{ км} < \rho < 10^{11} \text{ км}$	Индукция, Диэлектрофоретический движение, и Трибоэлектричество	То же, что и выше
$\rho > 10^{11} \text{ км}$	Диэлектрофоретический движение и Трибоэлектричество	То же, что и выше & Низкий уровень работы функция разница между связаться с поверхности.

Постоянная времени индукционного заряда частицы, покоящейся на диэлектрическом экране, зависит от проведения заряда, имеющего ту же полярность, что и мгновенная полярность электрода, от частицы к диэлектрической поверхности экрана. Во многих случаях применения EDS предполагается, что частицы состоят из диэлектрических материалов с потерями, а экраны также имеют значительную поверхностную проводимость для проведения заряда от частиц. Необходимо иметь необходимую поверхностную проводимость, чтобы избежать накопления заряда на поверхности диэлектрического экрана.

Требование к поверхностной проводимости является критическим фактором в работе EDS для всех трех случаев наличия частиц на поверхности пленки. Чрезмерная поверхностная проводимость будет экранировать электрическое поле, в то время как очень высокое удельное сопротивление приведет к чрезмерному накоплению поверхностного заряда на пленке, что повлияет на приложенное поле, уменьшит трибозарядку и увеличит адгезию частиц к поверхности. Поскольку постоянная времени зарядки частицы зависит от произведения удельного сопротивления ($\rho\rho$) и диэлектрической проницаемости (t) частицы, эффективное поверхностное сопротивление частицы также зависит от поверхностного сопротивления экрана. Если $\rho\rho$ - эффективное удельное сопротивление частицы на поверхности экрана, то постоянная времени заряда (z ,) может быть аппроксимирована как

$$\tau_c = \varepsilon_2 \varepsilon_0 \rho_p \quad (48)$$

$E_d \approx 8,854 \times 10^{12} \text{ F/m}$

Индукционная зарядка происходит для всех материалов, но становится эффективной, когда

$$\ll T$$

где T - период времени приложенного электрического поля $\sin \pi t$, а s - период времени.

проницаемость свободного пространства. Например, если $\rho_p 10^8 \text{ f2m}$, а $2= 2.0$, то постоянная времени заряда составит приблизительно 2 мс, что намного меньше 250 мс периода времени (T), если приложенное переменное поле имеет частоту 4 Гц. На рисунке 7 показан пример частицы

Траектория частицы диаметром 2 гм, которая приобрела положительный заряд q в течение полупериода перед $t= 0+$, будет идентична траектории частицы, показанной на рисунке (рис. 7).

Для частиц с большим удельным сопротивлением зарядка происходит в основном за счет комбинации диэлектрофореза, индукции и трибоэлектризации. В случае применения для борьбы с пылью на поверхности Марса и Луны, где влияние влажности окружающей среды пренебрежимо мало, процесс зарядки не будет зависеть от содержания влаги.

Экспериментальное описание

Экспериментальная установка

1. Подготовка образцов: Эксперименты по тестированию электродинамических экранов на эффективность удаления пыли (DRE) проводились с имитатором пыли АО "Марс-1". Образцы пыли были получены из Лаборатории реактивного движения, Пасадена, Калифорния. Перед каждым испытанием образец высушивался в печи при температуре 100°C в течение не менее 24 часов. Для каждого эксперимента небольшое количество пыли диспергировалось с помощью порошкового насоса - всасывающего устройства для аэродинамического рассеивания пыли в воздухе с образованием аэрозоля. В качестве альтернативы использовалась продувочная чашка [8] для трибозарядки и диспергирования пыли.

2. Классификация по размеру: Аэрозоли, содержащие частицы пыли, классифицировались с помощью циклонного классификатора, который удалял крупные частицы, диаметр которых превышал 10

{ μm . Мелкая фракция аэрозоля, использованная для испытаний, содержала частицы со средним диаметром счета (CMD) от 2 до 6 джимов и средним диаметром Вульме (или массовым) от 8 до 15 мм. Этот диапазон размеров соответствует ожидаемому облаку марсианской пыли, как показано в таблице 3 (рабочее состояние электродинамического экрана).

3. Зарядка и нейтрализация заряда пылевого облака: Для зарядки частиц тестового аэрозоля использовались коронные зарядные устройства для униполярной зарядки, либо с положительной, либо с отрицательной полярностью. Однако в большинстве частицы пыли трибозарядились путем кувывркания с шариками из нержавеющей стали или тефлона в контейнерах из нержавеющей стали или тефлона. Об этих процессах сообщалось ранее [8, 11, 12]. Образовавшееся облако пыли, независимо процесса ее рассеивания, содержало заряженные частицы. Для нейтрализации частиц пыли использовался нейтрализатор заряда (Simco Model PFC 20). Нейтрализация заряда была необходима для тестирования экрана против незаряженных частиц.

4. Электродинамический экран: Электродинамические экраны (ЭДЭ) были изготовлены в виде печатных плат. Перед использованием экраны были покрыты полиуретаном для предотвращения электрической дуги при высоком напряжении. Экраны были протестированы при нескольких рабочих параметрах (частота, напряжение, время обода) для достижения оптимальных характеристик. Экраны были протестированы на наличие незаряженных, заряженных и нейтрализованных частиц пыли.

5. Процедура испытаний: Для испытания устройств EDS, работающих либо с однофазным, либо с трехфазным переменным **током**, использовалась камера с пылевым **облаком** и соответствующей вентиляцией. Тестовый EDS размещался в нижней части камеры, а тестовый аэрозоль вводился сверху. Распределение частиц по размерам и зарядам измерялось с помощью анализатора ESPART. Распределение размеров пыли-имитатора также измерялось с помощью анализатора MicrotracB. Эффективность удаления пыли (DRE) EDS рассчитывалась путем измерения общей массы пыли на экране до и после включения.

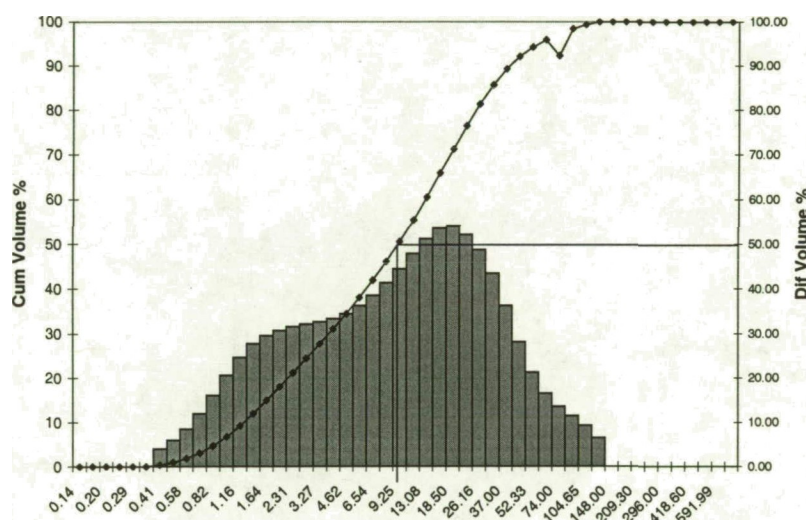


Рис.10. Гранулометрический состав имитатора пыли ОАО "Марс-1" с использованием анализатора Microtraco

Результаты

Гранулометрический анализ имитатора пыли ОАО "Марс-1" с помощью анализатора Microtrac& представлен на рис. 10. Значения d_{50} составили 1,22 мкм, 9,06 мкм и 38,45 мкм соответственно. Счетный медианный диаметр пыли-имитатора с помощью анализатора ESPART составил 3,66μm (STDEV 0,19, n= 15), как показано на рис. 11.

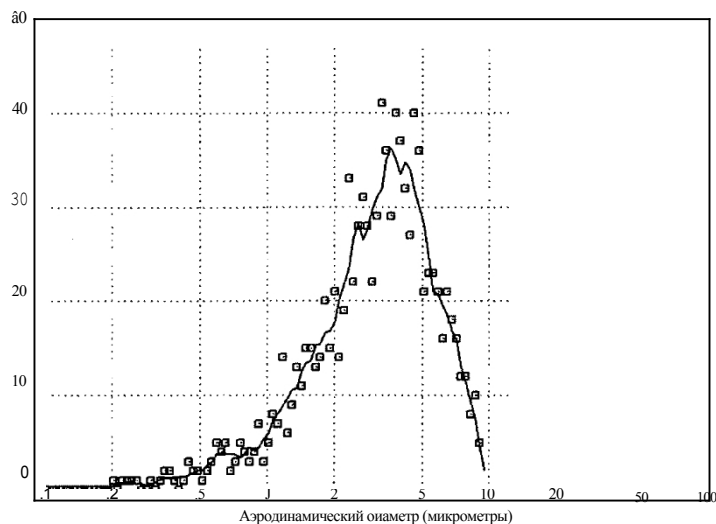


Рис. 11. Распределение размеров имитатора пыли АО "Марс-1" с помощью анализатора ESPART

Отношение заряда к массе (Q/M) имитационной пыли с помощью анализатора ESPART составило -2,7 дж/г (рис. 13). Такое распределение заряда является результатом (1) межчастичной зарядки, (2) трибозарядки при измельчении и (3) процессов обработки. Моделируемые образцы пыли не подвергались измельчению или коронной зарядке

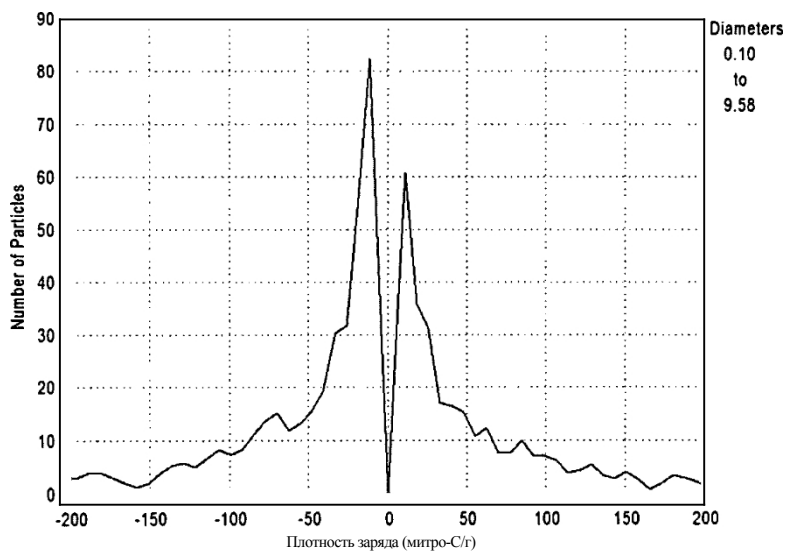


Рис. 12. Распределение размеров имитатора пыли JSC Mars-1, измеренное анализатором ESPART

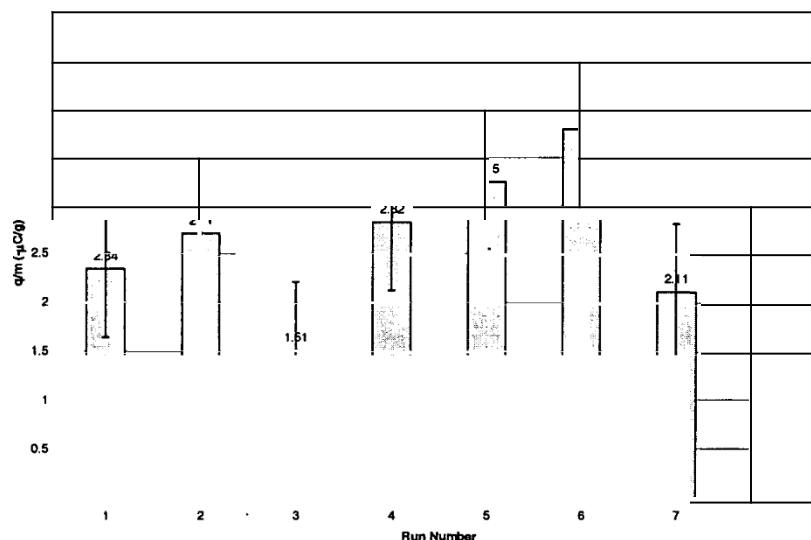
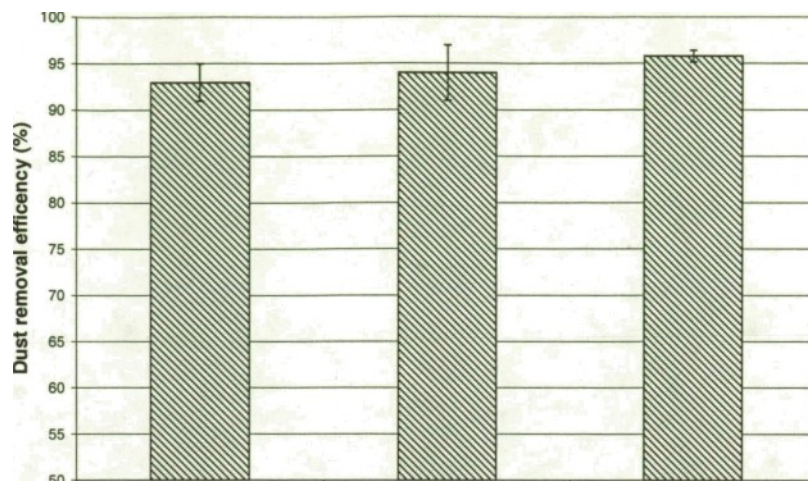


Рис. 13. Отношение заряда к массе частиц имитатора пыли АО "Марс-1", измеренное с помощью анализатора ESPART. Частицы были естественно заряжены.

Когда частицы пылевого облака подвергались дополнительной трибозарядке или разрядке, было замечено, что имитирующая пыль заряжается положительно по отношению к тефлону и отрицательно по отношению к нержавеющей стали как в воздухе, так и в CO₂-атмосфере [11, 12]. Когда частицы были нейтрализованы, большинство из них показали заряд, близкий к нулю. Однако Q/M для имитирующей пыли значительно снизился в сухой CO₂-среде. Далее производительность экрана была проанализирована и для нейтральных частиц (рис. 4). Было обнаружено что DRE экрана не ухудшалась для нейтральных частиц.

Определены эффективное напряжение, форма волны и частота для удаления пыли при атмосферном давлении с помощью однофазных систем ЭОП [9-12]. Эффективность удаления пыли составила 85 % для заряженного имитатора пыли JSC Mars-1 при возбуждении однофазным переменным током [9]. Влияние размера частиц на эффективность пылеудаления в трехфазной системе ЭЦР показало преимущество является трехфазный режим работы [10-12]. Эффективность удаления пыли более 90% была достигнута для EDS с расстоянием между электродами 1,27 мм (рис. 14).



Применяемое напряжение (вольт в пиковом режиме)

Рис. 14. Эффективность удаления пыли трехфазным электродинамическим грохотом, работающим при напряжениях 750, 1000 и 1250 вольт (расстояние между электродами 1,27 мм, трасса 0,127 мм, частота 4 Гц, время очистки 30 с.

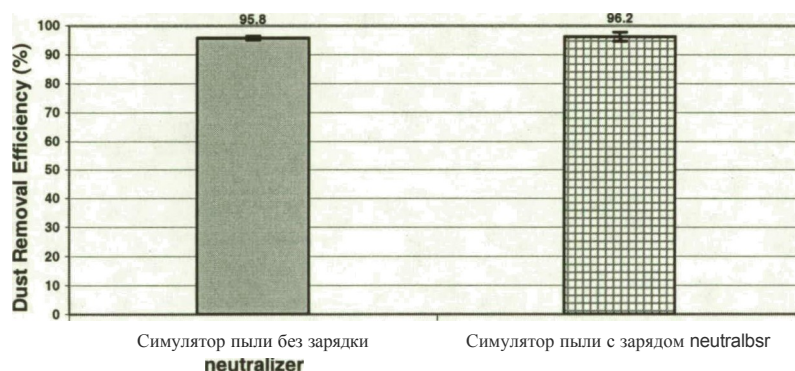


Рис. 15. Эффективность удаления пыли 3-фазным электродинамическим экраном с нейтрализатором заряда и без него (расстояние между электродами 1,27 мм, трасса 0,127 мм, 1250 В пик-пик, 4 Гц, время работы 30 с, медианный (аэродинамический) диаметр графа = 3,66 ОИТ, $\square m$).

duo = 1,22 PITI, dso = 9-06 DITI, d = 38,45

Обсуждение

Здесь мы представили основные принципы работы электродинамического экрана для удаления частиц пыли. Также представлены характеристики электродинамического грохота, показывающие, что эффективность удаления пыли (DRE) составляет более 80% для желаемого размера и диапазона зарядов частиц, ожидаемых в марсианской атмосфере.

В результате математического анализа получены выражения в замкнутой форме для положения заряженных частиц, управляемых напряжениями бегущей и стоячей волны. Представлены представительные решения траекторий частиц в зависимости от начального положения и частоты. На следующем этапе работы будут взяты параметры реальных экспериментов и построены графики

рассчитали траектории движения заряженных частиц и связали их с эффективностью электродинамического экрана.

В представленном здесь анализе были сделаны упрощающие предположения о том, что инерция заряженных частиц пренебрежимо мала и что самополе заряженных частиц, включая силы изображения, пренебрежимо мало по сравнению с наложенными полями от напряжений бегущей и стоячей волны. На следующем этапе анализа мы попытаемся ослабить эти предположения, чтобы изучить эффекты инерции и самополя.

Результаты испытаний также показывают, что работа EDS остается эффективной для всех трех условий зарядки: (1) положительно заряженные частицы, (2) отрицательно заряженные частицы и

(3) частицы с чистым зарядом, близким к нулю. Дизайн конструкции EDS также был оптимизирован эмпирически. Однако большинство проведенных до сих пор испытаний проводились при атмосферном давлении и при низком атмосферном давлении выше 100mb.

В таблице 3 приведены атмосферные условия Луны и Марса. Атмосферное давление на Марсе колеблется от 0,75 до 7,5 мб при температуре окружающей среды от -70 до 20 °C. На поверхности Луны атмосфера отсутствует.

ТА Б Л И Ц А 3: УСЛОВИЯ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ ЭКРАНОВ (ДЭС) НА ЛУНЕ И МРС.

Свойства поверхности	Луна	Марс
Гравитационная сила	0,165 г (1/6 г)	0,38 г (1/3 г)
Поверхностная атмосфера атмосферное давление	10 ⁻¹ мб	0,75 - 7,5 мб
Первичная атмосфера. состав атмосферы	Никакой атмосферы	959с CQ ; 2.79с Nt 0,15 9" Oz , 0,039о HzO (нет Жидкая вода)
Температура поверхности. вариации текстуры	сильно различается от -223 С до 1 2 3 С (темнота) (солнечный свет)	Среднее: -63С - 7 0 С - 2 0 С
Скорость ветра	сильный солнечный ветер	От 2 до 10 мл; до 30 мл пыли sioptt
Вязкость	Никакой атмосферы	1,014 * 10 Н*с/м'
Атмосферная пыль Поверхностный слой	Никакой атмосферы Толстый слой пыли на лицевой поверхности с магнитной ма- териал	Пыльная атмосфера 9 * 101 кг/м³ (нормальный) 7 - 10" кг/м (пыльная буря) PSD: от 0,5 до 5 0 м (диам.) CMD = 1 . 6 м (диам.) Толстый слой пыли на поверхности
Магнитное поле	Нет глобального магнитного поле Не экранирует солнечный ветер	Потеряла свое магнитное поле 3,5 миллиард лет назад, но имеет сильные локальные или коровые маг- сетчатое поле
Global Electric Полевая электрическая пробойка	Заряженная пыль сюр- лицо Пашен пробой может возникают при низком напряжении. возраст - 100 В	Высокое локализованное электрическое поле во время пыльных дьяволов. Напряжение пробоя по Пашену - 700 В

Основная проблема при эксплуатации EDS заключается в том, чтобы избежать пробоя Пашена электродинамического поля, приложенного к экрану при марсианском давлении. Напряжение пробоя или искровой потенциал, согласно закону Пашена, является функцией произведения pd , где p - давление окружающей среды, а d - расстояние между электродами. Поле пробоя не является линейной pd ; оно зависит от фактического значения d и числа столкновений, совершаемых электроном при пересечении зазора d , которое зависит от плотности газа.

В настоящее время мы оптимизируем расстояние d и электрическое поле для терки EDS при давлении окружающей среды до 5 мб, в атмосфере CO. Также были разработаны экраны для условий высокого вакуума, имитирующих лунную среду. При таких экстремально низких давлениях закон Пашена допускает очень высокие потенциалы. Ограничения на потенциалы обусловлены близостью электродов, пробивными свойствами подложки и покрытий, нанесенных на сами электроды.

Выводы

Электродинамические экраны (ЭДЭ) изготавливаются из прозрачного пластика, например ПЭТ, устойчивого к ультрафиолетовому излучению, и набора параллельных проводящих электродов из прозрачного оксида индия-олова (ITO) или проводящего полимера, встроенных под тонкую прозрачную пленку на поверхности. Прозрачная пластиковая пленка EDS может быть эффективно использована для защиты солнечных панелей от осаждения пыли и затемнения солнечного излучения. При приложении к электродам трехфазного переменного электрического поля высокого напряжения возникающее электродинамическое поле отталкивает и удаляет частицы пыли с экранов независимо от того, заряжены или не заряжены частицы пыли изначально. Результаты испытаний показывают, что самоочищающиеся солнечные панели могут быть изготовлены с использованием электродинамических экранов, которые будут получать мощность - около одного ватта на квадратный метр солнечной панели, которая производит пиковую мощность около 800 ватт. С учетом дополнительных потерь в трехфазном высоковольтном, по оценкам, от солнечной панели может потребоваться около 10 Вт - небольшая часть, только при необходимости очистки. При нормальных атмосферных условиях на Марсе очистка будет занимать всего несколько минут за один сол. Во время пыльных бурь потребуются более частая очистка. Электродинамические экраны, как было показано, работают и в условиях жесткого вакуума Луне.

Благодарности

Теоретические и экспериментальные исследования проводятся совместно на факультете прикладных наук Арканзасского университета в Литл-Роке (UALR), в лаборатории электромагнитных и электронных систем Массачусетского технологического института, лаборатории электростатики и физики поверхности Космического центра НАСА имени Кеннеди, Лаборатории реактивного движения НАСА и Аппалачского государственного университета (ASU), штат Северная Каролина. Исследования проводились при поддержке гранта НАСА NRA 02-055-01 (ROSS-2002), контракта JPL No. 1263202. Правин Шрирама, Дэвид Кларк и Крис Уайатт из UALR за их вклад в это исследование.

Ссылки

- [1] S. Масуда, "Электрическая завеса для удержания и транспортировки облаков заряженных частиц", в журнале *Advances in Static Electricity*, 1, Auxilia, S.A., Brussels, pp. 398-414, 1970.
- [2] S. Масуда, "Электрический занавес для удержания и переноса заряженных аэрозольных частиц", *Труды конференции по электростатике в Олбани*, 1971.
- [3] S. Масуда, К. Фуджибаяси, К. Ишида и Х. Инаба, "Удержание и транспортировка заряженных аэрозольных облаков с помощью электрического занавеса", *Электронная техника в Японии*, 92, pp. 9-18, 1972.
- [4] S. Масуда и Й. Мацумото, "Электрическая завеса контактного типа для электродинамического контроля заряженных частиц пыли", *Труды 2-го Международного совещания по статической электрификации*, Франкфурт, 1973.
- [5] J. R. Melcher, "Электроконвекция, вызванная бегущей волной", *Phys. Fluids*, vol. 9, no. 8, pp. 1548-1555, 1966.
- [6] J. A. Cross, *Electrostatic Principles, Problems and Applications*, Bristol, U. K.: Adam Hilger, 1987.
- [7] H. A. Pohl, *Dielectrophoresis*, Cambridge University Press, Cambridge, 1978.
- [8] S. Тригвелл, "Корреляция между структурой поверхности и трибозарядкой порошков", *докторская диссертация*, кафедра прикладных наук, Арканзасский университет в Литл-Роке, Литл-Рок, АР, 2003.
- [9] A. S. Biris, D. Saini, P. K. Srirama, M. K. Mazumder, R. A. Sims, C. I. Calle, C. R. Buhler, "Электродинамическое удаление загрязняющих частиц и его применение", *IEEE-IAS 39th Annual Meeting*, Seattle, WA, 2004.
- [10] К.Э. Джонсон, П.К. Шрирама, Р. Шарма, К. Прусснер, Ж. Чжан и М.К. Мазумдер: Влияние распределения частиц по размерам на производительность электродинамических систем просеивания, 40-я ежегодная встреча IEEE-IAS, Гонконг, 2005.
- [11] Р. Шарма, П. К. Шрирама, М. К. Мазумдер, Д. В. Кларк, "Электростатические свойства имитаторов марсианской/лунной пыли и их влияние на работу пылеулавливающих устройств", *Круглый стол по космическим ресурсам VII: конференция LEAG по исследованию Луны, Лиг-Сити, Техас*, 2005.
- [12] М. К. Mazumder, A. S. Biris, C. U. Yurteri, R. A. Sims, R. Sharma, C.E. Johnson, K. Pruessner, C.I. Calle, S. Trigwell, C.R. Buhler, and J.S. Clements, "Solar Panel Obscuration by the Dust in the Martian Atmosphere," *Particles on Surfaces 9: Detection, Adhesion And Removal*, VSP, 2006 (In Press).