

## Электродинамика ракетно-космического полета и электродинамические методы контроля и диагностики изделий РКТ

 Еще не с нами? [Лови скидку](#) на первую подписку!

### Электродинамические процессы, возникающие на изделиях РКТ в процессе полета

#### Электрическая зарядка изделий РКТ при взаимодействии с внешней средой

#### Электризация изделий при движении в атмосфере на активном и пассивном нисходящем участках полета

Под внешней средой понимаются области пространства, в которых происходит полет изделий РКТ - атмосфера, ионосфера, магнитосфера. При этом имеют место, в первом приближении, следующие границы областей: атмосфера простирается до высот 60-80 км, ионосфера - до 1000-2000 км, магнитосфера - высоты более 2000 км.

Процессы электризации в данных средах различны.

В атмосфере они, в основном, определяются взаимодействием взвешенных частиц и облаков атмосферы с поверхностью изделия. В ионосфере и магнитосфере - плазменными процессами, а также процессами электронной и ионной эмиссии и облучения высокоэнергетическими частицами и ультрафиолетом.

При движении на активном участке в нижних слоях атмосферы электрический заряд, который может приобрести изделие при полете в облаках и осадках, а также при столкновении с частицами пыли, зависит, как от свойств среды, в которой оно летит (размеров и числа частиц в облаках и осадках, их фазового состояния, формы частиц, величины электрического заряда на них, значения напряженности электрического поля атмосферы), так и от характеристик самого изделия - его конструкции, в частности, материала покрытия поверхности корпуса и режима полета (мощности двигателей, высоты, скорости).

При столкновении частиц влаги или пыли с корпусом летательного аппарата в момент их отрыва от поверхности, частицы приобретают заряд одного знака, а на корпусе летательного аппарата остается заряд противоположного знака. Величины возникающих зарядов определяются электрическими свойствами поверхностей частиц и корпуса изделия. Чем больше разность энергий выхода электронов в соприкасающихся телах, тем большие заряды возникают после их удара. Этот процесс зарядки повторяется при каждом ударе новой частицы и последующим ее отскоке от корпуса изделия.

Электрический заряд, возникающий на корпусе при разрыве контакта между ним и частицей определяется уравнением [18].

$$Q = \varphi_{кр} C_{1,2} (1 - e^{t/\tau})$$

где:  $\varphi_{кр}$  - контактная разность потенциалов для данного вида

носителя заряда;

$C_{1,2}$  - емкость между частицами в момент разрыва электрического контакта между ними;

$t$  - время контакта частиц;

$\tau$  - время релаксации, определяемое диэлектрической проницаемостью и электропроводностью частиц.

Для постоянного уровня электростатической зарядки изделия, то есть когда  $dQ/dt = 0$ , справедливо следующее соотношение:

$$(J_{31} + J_{32} + J_{33}) - (J_{p1} + J_{p2} + J_{p3} + J_{p4}) = 0,$$

где  $J_{31}$  - ток зарядки, вызванный взаимодействием частиц облаков и осадков с поверхностью изделия;

$J_{32}$  - ток зарядки, вызванный натеканием на корпус изделия частиц уже заряженных в атмосфере;

$J_{33}$  - ток зарядки, обусловленный работой двигателя изделия;

$J_{p1}$  - ток, заряжающий изделие благодаря электрической проводимости атмосферы;

$J_{p2}$  - ток, заряжающий изделие за счет проводимости газов реактивной струи;

$J_{p3}$  - токи коронирования с заостренных частей изделия и специальных разрядников;

$J_{p4}$  - ток, уносимый частицами, срываемыми с заряженного изделия.

При нарушении этого равенства происходит изменение электрического заряда и потенциала изделия.

Потенциал изделия мог бы достигать значений порядка тысяч вольт. Однако в действительности за счет токов утечки равновесный потенциал и, соответственно, заряд достигает меньших значений:

$$Q = A \cdot n_4 \cdot v_{изд} \cdot \varphi_{кр} \cdot r_4 \cdot \tau$$

где, 
$$\tau = \frac{1}{B \cdot n_4 \cdot r_4 \cdot U \cdot C \cdot \lambda}$$

где:  $A, B, C$  - постоянные для данного изделия;

$r_4$  - среднеквадратичный радиус частиц;  $\tau$  - время установления равновесного заряда (является функцией свойств и размеров частиц и скорости изделия);

$U$  - скорость изделия;  $n$  - количество частиц.

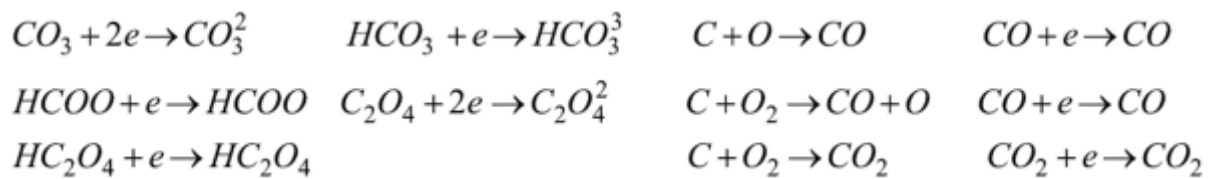
В чистой безоблачной атмосфере количество твердых частиц уменьшается с увеличением высоты. В соответствии с этим максимальные уровни электризации в такой атмосфере будут наблюдаться при полете изделия на небольших высотах. Этому способствует и электрическое поле Земли. Максимальные уровни электризации будут также при полете изделий в облаках и осадках.

Особо сильное электростатическое заряджение может наблюдаться на диэлектрических поверхностях изделий. Оно может сопровождаться электрическими разрядами по их поверхности. При увеличении

температуры поверхности диэлектриков возможны разрядные процессы с поверхности диэлектрика на корпус изделия или на рядом расположенные соединительные линии и приборы [1].

При движении изделий в атмосфере Земли с гиперзвуковыми скоростями на пассивном нисходящем участке полета также возможны процессы электрического заряжения изделий. В этом направлении большой фактический материал собран по вторгающимся в атмосферу Земли со скоростями 10-50 км/с [19-21] метеоритам и метеорам, которые могут быть, в данном случае, аналогами таких изделий. Выполнены определенные теоретические проработки [22, 23]. Основными процессами, обуславливающими электризацию изделий на данном участке полета, являются процессы электронной и ионной эмиссии.

Отрицательная ионная эмиссия имеет место при сублимации и абляции, пиролизе и химических реакциях горения поверхности тела, движущегося на нисходящем участке. Отрицательные ионы образуются вследствие присоединения электронов атомами, молекулами приповерхностного слоя, обладающими электронным сродством. Вероятность захвата электрона определяется коэффициентом прозрачности потенциального барьера [24]. Основными реакциями, протекающими с образованием отрицательных ионов, в частности на поверхности материалов, содержащих углерод, могут быть следующие:



Скорость покидания поверхности отрицательными ионами  $v_i$ , достаточно велика и определяется тепловым эффектом реакции  $Q_p$  и массой иона  $m_i$

$$v_i = \sqrt{2Q_p / m_i} \approx 10^4 \text{ м/с}$$

Положительный потенциал тела  $\phi$ , обусловленный отрицательной ионной эмиссией, определяется энергией отрицательных ионов, покидающих поверхность тела, то есть:

$$\phi = \frac{m_i v_i^2}{2e} = \frac{Q_p}{e} \approx 5 \div 22 \text{ (В)}$$

Отрицательные ионы в конечном счете уносятся в спутный след. При этом между тыльной, по отношению к вектору скорости, поверхностью движущегося тела и спутным следом возникает разность потенциалов.

Рассматривая движение тел с гиперзвуковыми скоростями в атмосфере Земли на нисходящем участке можно выделить четыре стадии их полета по высотам [24]:

- а) 150-100 км - режим свободномолекулярного обтекания тел молекулами и ионами окружающей среды;
- б) 100-80 км - переходный режим;
- в) 80-20 км - режим континуального обтекания при сравнительно постоянной скорости движения;
- г) 20-0 км - континуальный режим с резким падением скорости.

На первом участке эффекты электризации тел выражены слабо и проявляются в основном в виде возбуждения и свечения газа на лобовых поверхностях. Можно предположить, что и на третьем участке процессы электризации выражены слабо. Это объясняется тем, что несмотря на интенсивную абляцию

разрушение и унос материала, плотность плазмы вокруг тела и в спутном следе на этом участке движения очень велика. Возникающие электростатические заряды нейтрализуются вследствие повышенной проводимости среды.

Наиболее интенсивных процессов электризации и разделения зарядов можно ожидать на втором и, особенно на четвертом участке нисходящего полета. Это обусловлено тем, что плотность термической плазмы на этих участках снижается, а процессы электризации вследствие эмиссии отрицательных ионов, уноса блоков молекулярных решеток и твердых частиц достаточно интенсивны. Пониженная плотность термической плазмы затрудняет процессы нейтрализации электростатических зарядов в системе «тело - спутный след».

Плазма, образуемая за прямым скачком уплотнения и обтекающая тело, нагревает поверхность до высоких температур. Эмиссия электронов и особенно отрицательных ионов приводит к зарядке движущегося тела положительным зарядом. При этом в атмосфере образуется гигантский электрический диполь с положительным зарядом на теле и отрицательным - в плазменном спутном следе. Такое распределение электрических зарядов усиливается поляризационным эффектом в вытянутом проводящем спутном следе при его взаимодействии с электрическим полем Земли.

Положительный потенциал тела относительно окружающей его плазменной оболочки определяется на основе баланса электронно-ионных токов эмиссии и возвратных токов. В итоге между телом и плазменной оболочкой в пристеночном экранирующем дебаевском слое  $r_D$  устанавливается равновесная разность потенциалов. С учетом распределения потенциала между емкостями «тело - плазменная оболочка» и «плазменная оболочка - поверхность Земли» во внешнем пространстве возникает электростатическое поле. Как показывают оценки [23], при движении в атмосфере крупных метеоритов со скоростями 16-20 км/с и с радиусами 1 м и более, на низких высотах между телом и поверхностью Земли могут возникнуть электрические поля с напряженностью, равной пробойной (5.. .30 кВ/см).