

Таким образом, в данной работе реализован двухкаскадный самостоятельный разряд низкого давления без внешнего магнитного поля. Объемная генерация заряженных частиц в катодном каскаде обеспечивается электронами вторичной эмиссии со стенок катода по известной схеме [1, 2], а в анодном каскаде — путем ионизации плазменными электронами, разогрев которых происходит в поле ленгмюровских колебаний, раскачиваемых пучком электронов, ускоренных двойным электрическим слоем.

### Литература

- [1] Журавлев Б. И., Никитинский В. А., Гапоненко А. Т. ЖТФ, 1985, т. 66, № 8, с. 1637—1639.  
 [2] Никитинский В. А., Журавлев Б. И. ЖТФ, 1982, т. 52, № 5, с. 880—883.  
 [3] Стогний А. И., Никитинский В. А., Журавлев Б. И. Тез. докл. VI Всес. симпоз. по сильноточной электронике. Томск, 1986, ч. 1, с. 52—54.  
 [4] Бакит Ф. Г., Боданов А. А., Каплан В. Б. и др. ФП, 1981, т. 7, № 3, с. 547—559.

Рубежанский филиал  
 Ворошиловградского  
 машиностроительного института

Поступило в Редакцию  
 18 марта 1987 г.  
 В окончательной редакции  
 15 июня 1987.

УДК 537.324

Журнал технической физики, т. 58, в. 5, 1988

## ЭЛЕКТРИЗАЦИЯ ТЕЛ ОБТЕКАЮЩИМ ПОТОКОМ

В. М. Ленченко

### Общие замечания

Электризация твердых тел жидким или газообразным потоком представляет собой разновидность электризации тел трением.

Как известно, на границе раздела сред всегда существуют контактные заряды противоположного знака, расположенные по обе стороны поверхности. Их величина и пространственное распределение по нормали от поверхности зависят от физических свойств контактирующих сред. Контактная разность потенциалов (КРП) обусловлена этими же зарядами.

При трении контактные заряды разделяются механическим путем, а на свежей, вступающей в контакт поверхности происходит образование новых зарядов, которые потом также будут разделены. При этом заметная электризация тел происходит, если одно из них (условно покоящееся) является электропроводным, а движущаяся или обтекающая его среда — диэлектрик. В этом случае контактные заряды на внешней поверхности тела будут захватываться и уноситься обтекающим потоком, а противоположного знака заряды по другую сторону поверхности в твердом теле будут накапливаться до насыщения, определяемого обратными токами утечек.

Если равновесная КРП между телами известна (мы ее обозначим  $V_0$ ), то при трении в условиях обтекания и отсутствия утечек тело может зарядиться до потенциала  $V_{\max}$ , определяемого соотношением

$$V_{\max} = \frac{r}{d} V_0. \quad (1)$$

Здесь  $r$  — размер (радиус) заряжаемого тела (шарика),  $d$  — толщина двойного слоя контактирующих зарядов в условиях равновесия. Условие (1) соответствует такому потенциалу тела, при котором становится невозможным дальнейшая эмиссия из него зарядов на «свежую» незаряженную поверхность контактирующей среды.

Обычно  $V_0 \simeq 1/V$ ,  $d \simeq 10^{-7} \div 10^{-5}$  см, и поэтому шарик радиуса 1 см может зарядиться до потенциала  $V_{\max} \sim 10^6 \div 10^8$  В. Однако релаксация зарядов, связанная даже со слабой электропроводностью среды, приводит к гораздо меньшим потенциалам электризации, зависящим также и от скорости обтекающей среды, и условий электризации (температуры, ионизирующих факторов и т. д.).

Для простоты рассуждения будем рассматривать электризацию электропроводного тела ограниченных размеров, характеризуемых его электроемкостью  $C$  и обтекающей поверхностью  $S$ . Обозначим скорость потока  $v$ , контактные заряды тела (solids)  $Q_s$  и прилегающих к нему зарядов противоположного знака в окружающей среде  $Q_l$  (liquids). В статическом равновесии  $|Q_l| = |Q_s| = Q_0$ , где  $Q_0$  — термодинамически равновесный контактный заряд одного из знаков на границе раздела сред. В динамическом равновесии, когда тело находится в обтекающем потоке, именно  $Q_s > Q_l$ . Скорость релаксации заряда  $Q_l$ , связанная с установлением КРП у границ раздела сред, может быть аппроксимирована выражением

$$\left(\frac{\partial Q_l}{\partial t}\right)_i = -\frac{Q_l - Q_0}{\tau_i}, \quad (2)$$

где  $\tau_i$  — время релаксации КРП. В нашем случае  $\tau_i$  определяется инжекцией зарядов из твердого тела в окружающий диэлектрик.

Уменьшение  $Q_l$ , обусловленное увлечением контактных зарядов обтекающим потоком, может быть описано током конвекции (convection)

$$\left(\frac{\partial Q}{\partial t}\right)_c = -\frac{Q_l}{S\lambda} 2\pi r \lambda v \beta. \quad (3)$$

Здесь  $Q_l/S\lambda$  — плотность контактных зарядов на внешней поверхности тела,  $\lambda$  — толщина контактного слоя,  $S$  — поверхность тела,  $r$  — его радиус,  $\beta$  — коэффициент увлечения ионов потоком.

Следует учесть еще максвелловскую релаксацию контактных зарядов, связанную с электропроводностью окружающей среды

$$(\partial Q_s / \partial t)_M = -(Q_s - Q_l) / M. \quad (4)$$

С помощью приведенных выражений запишем для электризации тела следующие уравнения:

$$\frac{dQ_0}{dt} = -\frac{Q_s - Q_l}{\tau_M} + \frac{Q_0 - Q_l}{\tau_i}, \quad \frac{dQ_l}{dt} = -\frac{Q_l}{b} \beta v + \frac{Q_0 - Q_l}{\tau_i}, \quad (5), (6)$$

где  $b = S/2\pi r$  — эффективный путь обтекания (трения). В стационарном случае из уравнений (5) и (6) находим

$$Q_s = Q_0 \frac{b + \beta v \tau_M}{b + \beta v \tau_i}. \quad (7)$$

Поскольку для тела емкостью  $C$

$$Q = CV, \quad (8)$$

то для его потенциала имеем

$$V = V_0 \frac{b + \beta v \tau_M}{b + \beta v \tau_i}, \quad (9)$$

где  $V_0$  — равновесная (статическая) КРП.

Из (9) видим, что в пределе больших скоростей тела ( $\beta v \tau_i \gg b$ ) в диэлектрической среде  $V = V_0 \tau_M / \tau_i$ .

Для воздуха в нормальных условиях  $\tau_M \approx 4$  мин, а время релаксации КРП за счет инжекции зарядов из твердого тела в диэлектрик составляет от 10 до  $10^{-4}$  с. Так что при  $v \gg b/\tau_i$  потенциал тела  $V$  может достигать от 10 до  $10^6$  В.

Для получения потенциала обтекаемого тела, связанного с землей, необходимо пользоваться формулой (9), заменив в ней  $\tau_M$  на  $\tau_M^*$

$$\tau_M^* = \tau_M RC / (\tau_M + RC), \quad (10)$$

где  $R$  — сопротивление заземления,  $C$  — емкость тела.

С помощью уравнений (5) и (6) получаем выражение для тока заземления

$$I_s = \frac{Q_0 \beta v}{(b + \beta v \tau_i)} \frac{\tau_M}{(\tau_M + RC)} \quad (11)$$

$$V = V_0 \frac{b + \beta v - \frac{M}{\tau_i}}{b + \beta v \tau_i} \quad (12)$$

### Прикладные аспекты изложенной модели

Полученные уравнения могут иметь многочисленные применения, начиная с оценок накопления зарядов на летательных аппаратах при движении их в атмосфере земли и планет и кончая электризацией тел трением в различных технических устройствах. В последних случаях в формулах (9)—(12) надо положить

$$Q_0 = \epsilon_0 S, \quad (13)$$

где  $\epsilon_0$  — равновесная плотность поверхностных зарядов,  $S$  — площадь движущегося контакта,  $b$  — протяженность контакта по направлению движения.

В качестве примера оценим энергетические характеристики устройства в виде продуваемой ветром электропроводной сетки площадью в 1 м<sup>2</sup>. Если сетка образована переплетением металлических нитей диаметром 1 мм и размером ячейки 3 мм, то нетрудно оценить обдуваемую поверхность  $S$ ; она составит  $\approx 3$  м<sup>2</sup>. Контактный заряд на такой поверхности может достигать 10<sup>-4</sup> Кл при контактной разности потенциалов  $V_0 \sim 1$  В. На такой сетке при сильном ветре ( $v \gg b/\beta\tau_i$ ) может наводиться потенциал 10<sup>3</sup> В, а при ее заземлении в этих же условиях будет генерироваться ток  $J_s \approx 0.1$  А. Нагрузочным сопротивлением  $R$  сетка—земля можно регулировать снимаемую мощность генерируемого ветром электрического тока:  $W = J_s V$ . Оценки показывают, что при ветре с каждого квадратного метра продуваемой сетки можно снимать электрическую мощность до 100 Вт. Для этого надо только, чтобы материал сетки обладал хорошими инжекционными свойствами (малой работой выхода) и хорошей электропроводностью. Освещение и подогрев сетки уменьшают  $\tau_i$ , и это тоже немаловажный фактор в повышении КПД предполагаемого устройства, которое может быть использовано для прямого превращения энергии ветра в электрическую энергию.

Интересно отметить, что обдуваемые ветром деревья являются подобными устройствами, и при сильном ветре в их стволах, возможно, текут значительные электрические токи.

Электризуются ветром не только выступающие над поверхностью земли тела, объекты; электризуется у земли и переносит вверх значительные заряды восходящий поток воздуха. Так, по-видимому, следует рассматривать генерацию атмосферного статического электричества. Напряженность электрического поля в восходящем потоке может достигать величины, определяемой соотношением

$$eE = Bv, \quad (14)$$

где

$$B = \sum_s \alpha_s m_s \lambda_s n_s \bar{v}_s, \quad (15)$$

— коэффициент увлечения ионов по направлению ветра. В формуле (15)  $m_s$ ,  $n_s$ ,  $\bar{v}_s$ ,  $\lambda$  — массы концентрации, тепловые скорости и свободные пробеги атомов атмосферы;  $\alpha_s$  — числовой коэффициент (порядка нескольких единиц).

Оценки по формуле (14) показывают, что при  $v > 25$  м/с напряженность поля в восходящем потоке (переносящем ионы) может достигать  $E \geq 100$  В/м, и поэтому разность потенциалов между землей и облаками, образовавшимися при конденсации паров воды в восходящих потоках заряженного воздуха, могут превосходить 10<sup>5</sup> В ( $V = Eh$ , где  $h$  — высота облака). Сказанное имеет прямое отношение к механизмам и процессам электризации трением [1, 2] и генерации атмосферного электричества [3, 4].

### Литература

- [1] Захарченко В. В., Крячко Н. И., Мажара Е. Ф. и др. Электризация жидкостей и ее предотвращение. М.: Химия, 1975.
- [2] Тэнзеску Ф., Крамарюк Р. Электростатика в технике. М.: Энергия, 1980.
- [3] Мучник В. М., Филиман Б. Е. Электризация грубодисперсных аэрозолей в атмосфере. Л.: Гидрометиздат, 1982.
- [4] Имянитов И. М. Электризация самолетов в облаках и осадках. Л.: Гидрометиздат, 1970.