

04

## **Величина и знак электростатического заряда, потенциала и напряженности магнитного поля на поверхности металлического тела при его движении в атмосфере и ионосфере**

© В.А. Федоров

Радиотехнический институт им. акад. А.Л. Минца, Москва

E-mail: f\_v99@mail.ru

*Поступило в Редакцию 29 декабря 2016 г.*

Определены величина и знак электростатического заряда, потенциала и напряженности магнитного поля на поверхности металлического тела, движущегося в атмосфере и ионосфере. Показано, что на величину и знак отмеченных выше функций основное влияние оказывают скорость и высота движения тела.

DOI: 10.21883/PJTF.2017.22.45266.16656

Изучение проблемы электростатического заряжения электрически изолированных металлических тел, движущихся в атмосферном воздухе или плазме, было начато достаточно давно [1,2]. Данное обстоятельство связано с тем, что явление электризации металлических тел широко распространено в природе и технике, причем его возникновение часто приводит к негативным последствиям (см. ссылки в [1,2]). В частности, электризация металлических тел в воздушных потоках сильно влияет на процессы при полетах самолетов через облака, осадки и т.п. Например, величина потенциала на поверхности  $\varphi$  достигает значений  $\varphi \approx 10^5 - 10^8$  V относительно окружающей среды [3]. Поскольку в работе рассматривается изолированное металлическое тело, его потенциал может быть определен только относительно потенциала окружающей среды, который обычно принимается за нулевой [3].

Приведенные величины  $\varphi$ , полученные при теоретических и экспериментальных исследованиях электризации металлических тел в воздухе [1–3], оказывают значительное влияние на протекание физических процессов как на поверхности тела, так и в его окрестности. Степень

влияния в первую очередь зависит от величины электростатического заряда  $Q$  на поверхности. Поэтому при достижении телом, движущимся в атмосфере, определенных величин  $Q$  становится возможным возникновение таких физических явлений, как коронирование, электрический пробой среды, окружающей тело, ионизация молекул воздуха и т.д. [1–4]. Отмеченные явления возникают в окрестности тела при достижении его потенциалом определенной величины, что приводит к увеличению скорости движения заряженных частиц в его окрестности.

В настоящее время основным механизмом электростатического заряжения металлических тел при их движении в воздухе считается контактная разность потенциалов [1]. Исходя из этого механизма в работе [2] было получено, что при движении в атмосфере металлической сферы радиусом  $R = 100$  см на высоте  $h = 30$  км со скоростью  $v = 0.2$  км/с заряд достигает в равновесном ( $t \rightarrow \infty$ ) состоянии величины  $Q = 3.3 \cdot 10^7$  CGSE, а потенциал  $\varphi = Q/R = 9.9 \cdot 10^7$  В.

Если движение тела происходит на высотах  $h > 40$  км, то в атмосфере присутствуют ионы и электроны. Например, их концентрация на высоте  $h = 55$  км равна  $N_i = N_e = 10$  см<sup>-3</sup>, а на высоте  $h = 70$  км  $N_i = N_e = 10^2$  см<sup>-3</sup> [5]. Это приводит к тому, что на поверхность тела течет тепловой ток электронов, уменьшающий положительный заряд  $Q$ . В работе [6] решена задача об обтекании металлической сферы радиусом  $R = 100$  см потоком плазмы, движущейся со скоростью  $v = 0.2$  км/с на высоте  $h = 70$  км, где нейтральные частицы представляют собой молекулы воздуха. Было получено, что  $Q = 58$  CGSE,  $\varphi = 174$  В.

Возникающий заряд  $Q$  на поверхности металлической сферы при ее прямолинейном равномерном движении со скоростью  $v$  создает магнитное поле напряженностью

$$H = \frac{Qv}{r^2} \sin \alpha, \quad (1)$$

где  $\alpha$  — угол между вектором скорости  $v$  и рассматриваемым направлением,  $r$  — расстояние до точки наблюдения. Если положить  $\alpha = 90^\circ$ , а  $r = R = 100$  см, то из (1) можно получить значения  $H$  на поверхности сферы в направлении, перпендикулярном вектору скорости  $v$  для различных величин  $Q$  и  $v$ . Значения и знак функций  $Q$ ,  $\varphi$  и  $H$  при движении тела в атмосфере со скоростью  $v = 0.2$  км/с

представим в виде  $h = 30, 70 \text{ km}$  ( $Q = 3.3 \cdot 10^7, 58 \text{ CGSE}$ ;  $\varphi = 9.9 \cdot 10^7 \text{ V}$ ;  $H = 6.6 \cdot 10^5, 1.2 \text{ Oe}$ ).

Движение металлического тела в атмосфере с гиперзвуковой скоростью приводит к возникновению плазменной оболочки вокруг тела благодаря ионизации молекул воздуха [5]. Из результатов работ [5,7] получим значения концентрации электронов плазмы  $N_e$  на высотах  $h = 30, 60, 90 \text{ km}$  при соответствующих скоростях  $v = 3, 5, 7 \text{ km/s}$ , которые представлены следующим образом. При скорости  $v = 3 \text{ km/s}$ ,  $h = 30, 60, 90 \text{ km}$   $N_e = 2.0 \cdot 10^{11}, 2.5 \cdot 10^9, 7.0 \cdot 10^6 \text{ cm}^{-3}$ . При скорости  $v = 5 \text{ km/s}$ ,  $h = 30, 60, 90 \text{ km}$  ( $N_e = 7.7 \cdot 10^{14}, 1.2 \cdot 10^{13}, 7.0 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ ). При скорости  $v = 7 \text{ km/s}$ ,  $h = 30, 60, 90 \text{ km}$   $N_e = 7.4 \cdot 10^{15}, 7.7 \cdot 10^{13}, 4.0 \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-3}$ .

Учитывая приведенные данные и исходя из средней кинетической энергии электронов плазмы, примем, что средние значения кинетической температуры электронов плазмы для высот  $h = 30, 60, 90 \text{ km}$  в рассматриваемом случае равны  $T = 1000, 2000, 3000 \text{ K}$  соответственно. Для рассматриваемого случая оценим величину теплового тока электронов плазмы  $I_{ek}$  на поверхность тела в виде металлической сферы с  $R = 100 \text{ cm}$ . Из формулы

$$I_{ek} = \frac{1}{4} e N_e v_{ek} S, \quad (2)$$

где

$$v_{ek} = \sqrt{2kT/m_e} \quad (3)$$

— тепловая скорость электронов плазмы,  $S = 4\pi R^2$ ,  $e$ ,  $m_e$  — заряд и масса электрона,  $k$  — постоянная Больцмана, получим  $I_{ek1,2,3} = 5.2 \cdot 10^{13}, 9.3 \cdot 10^{11}, 3.2 \cdot 10^9$ .

Полученные значения  $|I_{ek1,2,3}|$  на несколько порядков превышают величину тока зарядки металлического тела, который можно оценить следующим образом. Принимая, что зарядка тела происходит равномерно, найдем  $I_q \approx Q/t \approx 5.2 \cdot 10^5/10 \approx 5.2 \cdot 10^4 \text{ CGSE/s}$  (см. рис. 2 в [2]). Таким образом, в данном случае электризацию тела на основе контактной разности потенциалов можно не учитывать. Следовательно, при движении в атмосфере с гиперзвуковой скоростью металлическое тело будет приобретать электростатический заряд отрицательного знака благодаря разности тепловых скоростей электронов и ионов. С учетом

Величины и знак функций  $Q, \varphi$  и  $H$  ИСЗ

$h$ , km	$T$ , К	$Q$ , CGSE	$\varphi$ , V	$H$ , Oe
250	1700	-0.05	-0.15	-4.0
500	2600	-0.07	-0.23	-5.7
1000	3000	-0.09	-0.27	-7.3

отмеченного, найдем, что

$$\varphi = kT/e, \quad (4)$$

$$Q = R\varphi. \quad (5)$$

Учитывая формулу (1), где примем  $v = 3$  km/s, получим значения  $H$  в данном случае. Найденные величины и знак функций  $Q, \varphi$  и  $H$  в зависимости от  $h = 30, 60, 90$  km и  $v$  ( $T = 1000, 2000, 3000$  К) при движении в атмосфере с гиперзвуковой скоростью представим следующим образом:  $Q = -0.03, -0.06, -0.09$  CGSE;  $\varphi = -0.09, -0.18, -0.27$  V;  $H = -9, -18, -27$  Oe.

Определим значения и знак функций  $Q, \varphi, H$ , которые имеют искусственные спутники Земли (ИСЗ), движущиеся в ионосферной плазме со скоростью  $v \approx 8.1$  km/s на высотах  $h = 250, 500, 1000$  km. Поскольку на рассматриваемых высотах в ионосфере концентрация нейтральных частиц на много порядков меньше, чем в атмосфере, механизм электростатического заряжения, в основе которого лежит контактная разность потенциалов, на данных высотах невозможен. Поэтому на отмеченных высотах действует механизм заряжения металлического тела, основанный на разности величин тепловых скоростей электронов и ионов плазмы или разности величин кинетических температур заряженных частиц плазмы [8].

На данных высотах в дневное время кинетическая температура электронов плазмы равна  $T = 1700$  К (250 km), 2600 К (500 km), 3000 К (1000 km) [8]. Принимая, что ИСЗ имеет форму сферы из металла радиусом  $R = 100$  см, и, используя принятые значения  $T$ , определим величины функций  $Q, \varphi, H$  и их знак с помощью формул (1), (4), (5). Найденные величины представим в таблице.

Знак функций  $Q, \varphi, H$  в таблице показывает, что они имеют отрицательные значения и достаточно малы по сравнению со значениями

аналогичных функций в случае движения металлического тела со скоростью, меньшей звуковой в атмосфере. Однако необходимо отметить, что на ИСЗ при попадании его в тень Земли [9] или в поток заряженных частиц от солнечных вспышек [9] возникают электростатические заряды (в основном отрицательные), создающие электрические потенциалы величиной  $\varphi \approx (1-10) \text{ kV}$  [9], при которых возможно возникновение электростатических разрядов или пробой среды.

Необходимо отметить, что при рассмотрении физических процессов, имеющих место в настоящей работе, использовались средние значения параметров частиц атмосферы и ионосферы (см. приведенную литературу).

## Список литературы

- [1] *Имянитов И.М.* // ДАН СССР. 1958. Т. 121. № 1. С. 93–96.
- [2] *Имянитов И.М., Старовойтов А.Т.* // ЖТФ. 1962. Т. 32. В. 6. С. 759.
- [3] *Имянитов И.М.* Электризация самолетов в облаках и осадках. Л.: Гидрометеиздат, 1970. 211 с.
- [4] *Добрецов Л.Н., Гомоюнова М.В.* Эмиссионная электроника. М.: Атомиздат, 1966. 564 с.
- [5] *Мартин Дж.* Вход в атмосферу. М.: Мир, 1969. 320 с.
- [6] *Федоров В.А.* // Физика плазмы. 2014. Т. 40. № 10. С. 946–952.
- [7] *Федоров В.А.* // ЖТФ. 2016. Т. 86. В. 5. С. 148–150.
- [8] *Альперт Я.Л., Гуревич А.В., Пятаевский Л.П.* Искусственные спутники в разреженной плазме. М.: Наука, 1964. 384 с.
- [9] Искусственные пучки частиц в космической плазме / Под ред. Б. Гранналя. М.: Мир, 1985. 456 с.