

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 φ 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 φ , 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⁻³, а на высоте $h = 70$ км $N_i = N_e = 10^2$ см⁻³ [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 α — 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 , φ 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, φ и H ИСЗ

h , km	T , К	Q , CGSE	φ , 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, φ 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, φ, 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, φ, H и их знак с помощью формул (1), (4), (5). Найденные величины представим в таблице.

Знак функций Q, φ, 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.