УДК 551.508.8

Electrical Model of a Charged Aerosol Particles in an Alternating Electromagnetic Field

Mark V. Biletov*,

Vladimir V. Mihajlov and Iliay E. Kuznetsov

*Military Training and Research Center of the Air Force
«Air Force Academy ft. Professor N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin»
54a Starykh Bol'shevikov Str., Voronezh, 394064, Russia*

Received 18.10.2015, received in revised form 11.11.2015, accepted 20.02.2016

In this paper, a model circuit of a charged aerosol particles allowing to study the resonant phenomena occurring in alternating electromagnetic field.

Keywords: charged aerosol particles; an alternating electromagnetic field; the surface conductivity of the particles.

Citation: Biletov M.V., Mihajlov V.V., Kuznetsov I.E. Electrical model of a charged aerosol particles in an alternating electromagnetic field, J. Sib. Fed. Univ. Eng. technol., 2016, 9(3), 360-365. DOI: 10.17516/1999-494X-2016-9-3-360-365.

Электрическая модель заряженной аэрозольной частицы в переменном электромагнитном поле

М.В. Билетов, В.В. Михайлов, И.Е. Кузнецов

*ВУНЦ ВВС «ВВА им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина»
Россия, 371600, Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54а*

В статье предложена модель токовой цепи заряженной аэрозольной частицы, позволяющая исследовать резонансные явления, возникающие в переменном электромагнитном поле.

Ключевые слова: заряженные аэрозольные частицы, переменное электромагнитное поле, поверхностная проводимость частицы.

При решении ряда важных практических задач используют допущения о том, что аэрозольные частицы, находящиеся в атмосфере, не имеют поверхностного заряда. Однако в природе довольно часто наблюдаются ситуации накопления большого количества заряда на части-

цах облаков и осадков. Наличие заряда на атмосферном аэрозоле, с одной стороны, изменяет характер протекающих атмосферных процессов, способствует укрупнению облачных частиц, ускоряет процессы осадкообразования, приводит к усилению электрической активности облака, что, в свою очередь, способствует возникновению таких опасных явлений погоды, как гроза, смерч и т.д. С другой стороны, наличие заряда на аэрозольной частице приводит к изменению электрофизических характеристик облаков и осадков за счет эффектов, возникающих при взаимодействии электромагнитной волны с заряженными аэрозолями [1].

Поэтому моделирование явлений, возникающих в заряженных аэрозольных частицах, находящихся под воздействием переменной электромагнитной волны, признано важной и актуальной задачей.

Цель данной работы – повышение качества информации о свойствах заряженных аэрозольных частиц, находящихся в переменном электромагнитном поле, путем построения модели токовой цепи и изучения на её основе резонансных свойств исследуемых аэрозолей.

Решение поставленной задачи осуществимо с помощью анализа первого уравнения Максвелла [2]. Под воздействием электромагнитной волны с напряженностью электрического поля $\vec{E}$ согласно уравнению Максвелла в заряженной аэрозольной частице возникают электрические токи, плотность которых можно выразить формулой

$$j_{\text{пол}} = j_{\text{см}} + j_{\text{пров}} + j_{\text{нов}} = \varepsilon \varepsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + g_{\text{пров}} \vec{E} + g_{\text{нов}} \vec{E}, \quad (1)$$

где $j_{\text{см}}$ – плотность тока смещения; $j_{\text{пров}}$ – плотность тока проводимости аэрозольной частицы в отсутствие на ней заряда; $j_{\text{нов}}$ – плотность поверхностного тока; ε – диэлектрическая проницаемость вещества частицы, ε_0 – диэлектрическая постоянная, $8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$; $g_{\text{пров}}$ – удельная проводимость вещества частицы; $g_{\text{нов}}$ – удельная поверхностная проводимость частицы, обусловленная поверхностным свободным зарядом.

Полагая $\vec{E} = E_m e^{j\omega t}$, где ω – круговая частота, t – время, будем иметь

$$j_{\text{пол}} = \dot{g}_{\text{см}} \vec{E} + g_{\text{пров}} \vec{E} + g_{\text{нов}} \vec{E}, \quad (2)$$

где $\dot{g}_{\text{см}} = j\varepsilon\varepsilon_0\omega$ – комплексное отображение проводимости смещения.

В силу малости собственной проводимости аэрозольных частиц $g_{\text{пров}}$, обусловленной свойствами вещества, током проводимости можно пренебречь, тогда

$$j_{\text{пол}} = \dot{g}_{\text{см}} \vec{E} + g_{\text{нов}} \vec{E}. \quad (3)$$

Величину поверхностной проводимости $g_{\text{нов}}$ найдем из соотношения

$$j_{\text{нов}} = g_{\text{нов}} \vec{E} = \frac{\sigma}{2\pi r} V, \quad (4)$$

где σ – поверхностная плотность заряда q аэрозольной частицы, имеющей радиус r ; V – скорость движения заряда.

Таким образом,

$$\dot{g}_{\text{нов}} = \frac{\sigma}{2\pi r} \cdot \frac{V}{\vec{E}}, \quad (5)$$

В переменном электрическом поле высокой частоты ω свободные электроны, находящиеся на поверхности частицы, будут двигаться со скоростью V под действием электрической силы (ионы не будут успевать перемещаться ввиду их большой массы).

$$F = eF_m \cdot \cos \omega t. \quad (6)$$

При этом уравнение движения с учетом столкновений электронов будет иметь вид [3]

$$eE_m \cdot e^{i\omega t} = m \frac{dV}{dt} + \beta m V. \quad (7)$$

Решение этого уравнения представляет собой

$$\dot{V} = \left[\frac{(e/m)\beta}{\omega^2 + \beta^2} - i \frac{(e/m)\omega}{\omega^2 + \beta^2} \right] \cdot \dot{E}, \quad (8)$$

где e – элементарный заряд электрона; m – масса электрона; β – частота соударения электронов.

Таким образом, поверхностная проводимость частицы, обусловленная наличием на ней свободных зарядов, по аналогии с [4] будет определяться выражением

$$\dot{g}_{нов} = \frac{\sigma}{2\pi} \left[\frac{(e/m)\beta}{\omega^2 + \beta^2} - i \frac{(e/m)\omega}{\omega^2 + \beta^2} \right]. \quad (9)$$

Данная величина является комплексной и соответствует индуктивному характеру проводимости. С учетом (4) плотность поверхностного тока будет иметь вид

$$\begin{aligned} i_{нов} &= \frac{\sigma}{2\pi} \left[\frac{(e/m)\beta}{\omega^2 + \beta^2} - i \frac{(e/m)\omega}{\omega^2 + \beta^2} \right] \cdot \dot{E} = \\ &= \sqrt{\left[\frac{\sigma}{2\pi} \frac{(e/m)\beta}{\omega^2 + \beta^2} \right]^2 + \left[\frac{\sigma}{2\pi} \frac{(e/m)\omega}{\omega^2 + \beta^2} \right]^2} \cdot E_0 e^{i \arctg \frac{\omega}{\beta}} e^{i\omega t}, \end{aligned} \quad (10)$$

где $\sqrt{\left[\frac{\sigma}{2\pi} \frac{(e/m)\beta}{\omega^2 + \beta^2} \right]^2 + \left[\frac{\sigma}{2\pi} \frac{(e/m)\omega}{\omega^2 + \beta^2} \right]^2} \cdot \dot{E}_m$ – комплексная амплитуда поверхностного тока.

Анализ формулы (10) позволяет заключить, что поверхностное сопротивление частицы таково:

$$\dot{Z}_{нов} = \frac{1}{\dot{g}_{нов}} = \frac{2\pi(1 + \beta^2/\omega^2)}{\sigma(e/m)} \left[\frac{\omega^2}{\beta} + i\omega \right] = R_{нов} + i\omega L_{нов}, \quad (11)$$

где $R_{нов} = \frac{2\pi(\omega^2 + \beta^2)}{\sigma(e/m)\beta}$ – омическое сопротивление (сопротивление потерь), обусловленное переходом электромагнитной энергии волны в тепловую энергию; $L_{нов} = \frac{2\pi(1 + \beta^2/\omega^2)}{\sigma(e/m)}$ – ин-

дуктивность поверхности заряженной аэрозольной частицы, обусловленная отставанием (опережением) поверхностного тока от тангенциальной отставляющей напряженности электрического поля электромагнитной волны в зависимости от соотношения частоты резонанса и частоты воздействующего электромагнитного поля.

Представим плотность тока смещения в виде

$$j_{cm} = i\varepsilon_0(1 + \chi)\omega\dot{E} = i\varepsilon_0\varepsilon\omega\dot{E}, \quad (12)$$

где χ – поляризуемость аэрозольной частицы.

Анализ размерностей в формуле (12) позволяет сделать вывод о том, что проводимость, обусловленная процессами смещения, имеет емкостную природу.

Для определения полного тока, протекающего в заряженной аэрозольной частице, необходимо воспользоваться интегральным уравнением Максвелла:

$$I = \int_S j dS = \int_S j_{cm} dS + \int_S j_{нов} dS. \quad (13)$$

Для сферической частицы решение уравнения (13) будет иметь вид

$$\dot{I} = \int_S j dS = \int_S i\varepsilon_0\varepsilon\omega\dot{E} dS + \int_S \frac{\sigma}{2\pi} \left[\frac{(e/m)\beta}{\omega^2 + \beta^2} - i \frac{(e/m)\omega}{\omega^2 + \beta^2} \right] \cdot \dot{E} dS. \quad (14)$$

В полярной системе координат с учетом тангенциальной составляющей напряженности электромагнитного поля, обуславливающей поверхностный ток, получим:

$$\dot{I} = i\varepsilon_0\varepsilon\omega\pi \cdot r^2 \dot{E} + \frac{\sigma \cdot r}{2} \left[\frac{(e/m)\beta}{\omega^2 + \beta^2} - i \frac{(e/m)\omega}{\omega^2 + \beta^2} \right] \dot{E}. \quad (15)$$

При определенных сочетаниях размеров аэрозольных частиц, их зарядов, а также диэлектрических свойств согласно представленной модели будет наблюдаться резонанс токов. Поэтому заряженную аэрозольную частицу, находящуюся в переменном электромагнитном поле, можно представить в виде эквивалентной схемы токовой цепи (рис. 1).

Анализ рис. 1 показывает, что заряженная аэрозольная частица, находящаяся под воздействием переменного электромагнитного поля, представляет собой параллельный колебательный контур, характеристиками которого является собственная резонансная частота ω_0 и добротность Q :

$$\omega_0 = \left[\frac{\sigma(e/m)}{2\pi\varepsilon\varepsilon_0(1 + \beta^2/\omega^2)} \right]^{\frac{1}{2}}, \quad Q = \frac{\omega_0 L}{R} = \frac{\omega_0 \left[\frac{2\pi(1 + \beta^2/\omega^2)}{\sigma(e/m)} \right]}{R}. \quad (16)$$

Расчеты, проведенные с использованием предлагаемой модели, представлены на рис. 2.

Рис. 1

Рис. 2

Анализ модели и результатов расчетов позволяют сделать следующие выводы:

1. При определенных соотношениях размеров аэрозольных частиц, поверхностной плотности их заряда, а также частоты воздействующей электромагнитной волны возникают резонансные явления.

2. Значение частоты, на которой происходит резонанс, зависит от электрофизических свойств аэрозольной частицы и величины её заряда.

3. Резонансные явления наблюдаются в дециметровом и метровом диапазоне длин волн для частиц радиусом от 10 до 50 мкм, имеющих заряды от $1.6 \cdot 10^{-19}$ Кл до $1.6 \cdot 10^{-16}$ Кл.

Результаты исследований подтверждаются экспериментами с дисперсными системами [5–8].

Таким образом, построенная электрическая модель токовой цепи заряженной аэрозольной частицы в переменном электромагнитном поле может служить основой для получения информации о зарядах аэрозольных частиц облачности и осадков радиолокационным методом.

Список литературы

[1] Ельцов В.А. *К вопросу о влиянии поверхностного заряда диэлектрических сфер на рассеяние электромагнитных волн*. Тр. САРНИГМИ. 1977. Вып. 48(129). С. 88. [El'tsov V.A. *To a question of influence of a superficial charge of dielectric spheres on dispersion of electromagnetic waves*. Tr. SARNIGMI, 1977, 48(129), 88 (in Russian)]

[2] Никольский В.В., Никольская Т.И. *Электродинамика и распространение радиоволн*. М.: Наука, 1989. 285 с. [Nikol'ski V.V., Nikol'skaia T.I. *Electrodynamics and distribution of radio waves*. Moscow, Science, 1989, 285 p. (in Russian)]

[3] Долуханов М.П. *Распространение радиоволн*. М.: Сов. радио, 1960. 273 с. [Doluhanov M.P. *Distribution of radio waves*. Moscow, Sov. Radio. 1960, 273 p. (in Russian)]

[4] Bohren C.F, Hunt A.J. *Scattering of electromagnetic waves by a charged sphere*. *Can. J. Phys.*, 1977. Vol. 55. P. 1930.

[5] Духин С.С. *Электропроводность и электрокинетические свойства дисперсных систем*. Киев, Изд-во «Наукова Думка», 1975. 256 с. [Duhin S.S. *Conductivity and electrokinetic properties of disperse systems*. Kiev, "Naukova dumka", 1975, 256 p. (in Russian)]

[6] Кузнецов И.Е., Билетов М.В. *Сверхкраткосрочный прогноз опасных явлений погоды по радиолокационным данным с учетом энергетического состояния атмосферы*. Научные технологии. 2012. Т. 13, № 3. С. 21 – 26. [Kuznetsov I.E., BiletoV M.V. *The supershort-term forecast of the dangerous phenomena of weather for radar data taking into account a power condition of the atmosphere*. High technologies. 2012, Vol. 13, 3, 21-26 (in Russian)]

[7] Патент РФ 2319981 (2008) // Б. И. 2008. № 8. [Patent for the invention № 2319981 2008. (in Russian)]

[8] Патент РФ 2491574 (2013) // Б. И. 2013. № 24. [Patent for the invention № 2491574 2013. (in Russian)]