

УДК 533.98:538.54:538.65:537.523.3

Роль вихревых токов в создании подъемной силы автономного излучателя радиоволн

А. И. Никитин, И. О. Лейпунский, Т. Ф. Никитина

Для проверки гипотезы о левитации шаровой молнии над поверхностью проводника благодаря индуцируемым в нем вихревым токам проведены эксперименты по измерению величины силы, отталкивающей от медной пластины катушку диаметром 5,2 см, запитанную переменным током частотой 440 кГц и мощностью 4,6 кВт. Найдено, что на расстоянии 3 см эта сила не превышает 0,1 Н и резко уменьшается при удалении пластины от катушки. Это исключает вихревые токи как причину парения шаровой молнии. Предложена новая гипотеза, согласно которой левитация шаровой молнии может быть объяснена существованием коронного разряда на ее поверхности.

PACS: 41.20.Gz; 52.80.Mg; 52.80.Hc

Ключевые слова: шаровая молния, левитация, вихревые токи, электрический заряд, коронный разряд.

Введение

Особенности движения шаровой молнии (ШМ) вдали от поверхности Земли могут быть объяснены наличием у нее электрического заряда. Поскольку напряженность электрического поля Земли, особенно во время активной грозовой деятельности, не остается постоянной, на траектории ШМ могут наблюдаться петли [1, рис. 9.9] или резкие изломы [1, рис. 9.5]. В то же время наличие электрического заряда ШМ должно однозначно определять характер ее движения вблизи проводников (поверхности Земли, электрических проводов): за счет индуцирования в них зарядов противоположного знака ШМ должна притягиваться к ним с силой

$$F_{at} = \frac{Q^2}{4\pi\epsilon_0(2l)^2}, \quad (1)$$

где Q — заряд ШМ;

l — ее расстояние до поверхности проводника;

ϵ_0 — электрическая постоянная.

При $l = 0,5$ м и $Q = 10^{-4}$ Кл $F_{at} = 90$ Н, при $Q = 10^{-3}$ Кл $F_{at} = 9 \cdot 10^3$ Н. Результатом действия этой силы должно стать неизбежное "падение" ШМ на проводник. Однако, согласно наблюдениям, часто ШМ не вступает в контакт с проводником, а зависает над ним или движется вдоль него на расстоянии,

равном нескольким ее диаметрам [2, рис. 5.28]. Это заставляет допустить, что на малых расстояниях от проводника возникает какая-то сила, отталкивающая ШМ от проводника. В работах [3—5] высказано предположение, что причиной возникновения этой силы может служить генерируемое ШМ высокочастотное излучение. Благодаря этому излучению в близлежащем проводнике наводятся вихревые электрические токи. Взаимодействие переменных магнитных полей этих токов с переменным магнитным полем излучателя ШМ приводит к появлению силы, отталкивающей его от проводящей поверхности. В настоящей работе проведено измерение величины силы, отталкивающей катушку, запитанную переменным током частотой 440 кГц, от медной пластины. Результаты измерений показали, что эта сила резко уменьшается при удалении пластины от катушки уже на величину ее радиуса. В связи с этим сделан вывод, что для свойственных для ШМ значений заряда, мощности и частоты электромагнитного излучения эта сила не может обеспечить парения ШМ над проводниками на расстояниях, равных нескольким ее диаметрам. В статье также обсуждаются другие механизмы, которые могут послужить объяснением причины левитации ШМ над проводниками.

Эксперимент и оценка параметров взаимодействия вихревых токов

В работе использовалась катушка из трех плотно уложенных витков медной трубки диаметром 3 мм, наружный диаметр d_c которой был равен 52 мм. Катушка подсоединялась к высокочастотному генератору ВЧГ4-10/0,44, способному гене-

Никитин Анатолий Ильич, главный научный сотрудник.

Лейпунский Илья Всеволодович, зав. лабораторией.

Никитина Тамара Федоровна, старший научный сотрудник.

Институт энергетических проблем химической физики РАН.

Россия, 117829, Москва, Ленинский просп., 38., корп. 2.

Тел. (499) 137-35-06. E-mail: anikitin@chph.ras.ru.

Статья поступила в редакцию 30 июля 2009 г.

рировать на частоте 440 ± 11 кГц мощность до 10 кВт. Расстояние от центра катушки до ввода в генератор составляло 20 см. Трубки, соединяющие катушку с генератором, одновременно играли роль пружины, которая при смещении катушки вдоль ее оси до 10 мм не имела остаточной деформации. Катушка располагалась над медной пластиной размерами 24×14 см и толщиной 2 мм. Верхняя часть пластины была покрыта изолятором из текстолита толщиной 1 мм. При включении генератора катушка отклонялась вверх от пластины, расстояние от нижнего края катушки до пластины измерялось с помощью катетометра В-630. Сила, смещающая катушку на определенное расстояние, была измерена с помощью грузов, которые благодаря нити, перекинутой через два блока, могли поднимать катушку (при выключенном генераторе). В экспериментах измеряли анодный ток генераторной лампы. При вариации анодного напряжения U_a от 1,5 до 5,0 кВ ток изменялся в пределах от 0,5 до 1,7 А. Напряжение на катушке при $U_a = 1,5$ и 5,0 кВ составляло, соответственно, $U_c = 88$ и 248 В. Исходя из этого был определен коэффициент взаимосвязи $k_t = U_a/U_c = 17,35 \pm 0,29$. Ток, проходящий через катушку, находили путем умножения значения анодного тока на коэффициент взаимосвязи k_t .

В работе [6] определены условия подвешивания металлических шаров в высокочастотном электромагнитном поле. Основные соотношения, полученные в этой работе, могут быть использованы для анализа результатов взаимодействия высокочастотного поля катушки с металлической пластиной. Согласно [6] силу F (дин), которая отталкивает металлический шар от витка с током, можно найти, зная расстояние Z (см) между центрами шара и витка, амплитуду переменного тока I (А), радиусы R_2 и R_1 (см) шара и витка, частоту тока ν (Гц) и удельное сопротивление материала шара ρ (мкОм·см), с помощью формулы

$$F = (3/50) \pi^2 I^2 G(x) A(y) (R_2/R_1)^3, \quad (2)$$

где безразмерный параметр $x = 2\pi R_2 [\nu / (\rho \cdot 1000)]^{1/2}$,

$$G(x) = 1 - \frac{3}{4x} \frac{\sinh 2x - \sin 2x}{(\sinh x)^2 + (\sin x)^2},$$

$$y = Z/R_1, \quad A(y) = y/(1 + y^2)^4.$$

(Заметим, что функция величин R_2 , ν и ρ , определяющая параметр x , имеет размерность $[\text{см}/(\text{Ом}\cdot\text{с})]^{1/2}$. Однако здесь x считается безразмерным и равным численному значению указанной функции при условии, что размер R_2 измеряется в см, частота ν — в Гц, а удельное сопротивление ρ — в мкОм·см). Для рассматриваемого случая взаимо-

действия катушки и пластины можно положить $R_1 = R_2 = R = 2,6$ см. На расстояниях $Z \gg R_1$, когда $y \gg 1$, функцию $A(y)$ можно заменить на $A(y) = 1/y^7$. С учетом сказанного можно записать:

$$F = K \dot{I}^2 G(x) (R/Z)^7, \quad (3)$$

где K — коэффициент пропорциональности; $G(x)$ — множитель, определяющий зависимость силы F от частоты тока ν и удельного сопротивления материала пластины ρ .

Значения удельного сопротивления металлов при комнатной температуре заключены в интервале 2—50 мкОм·см (для меди $\rho = 1,7$, для алюминия — 2,6, для железа — 8,8, а для титана $\square\square$ — 42 мкОм·см). На рис. 1 пунктиром показана зависимость параметра x/R от ν \square для $\rho = 50$ мкОм·см, построенная на основе графиков, приведенных в [6]. Видно, что с ростом частоты параметр x/R резко увеличивается и при $\nu > 1$ МГц он может достигать значений порядка 20—40. При $R = 2,5$ см соответствующие значения x будут равны 50—100. Функция $G(x)$ [6] при изменении параметра x от 0 до 7 увеличивается от 0 до 0,8, однако при дальнейшем увеличении x она растет очень медленно, плавно стремясь к предельному значению, равному единице. Вид функции $G(x)$, перестроенной в координатах $G(\nu)$, показан на рис. 1 сплошной линией. При частотах выше 10^5 Гц ее можно положить равной 1. Это означает, что рост величины силы F с увеличением частоты тока практически останавливается при $\nu = 10^5$ Гц.

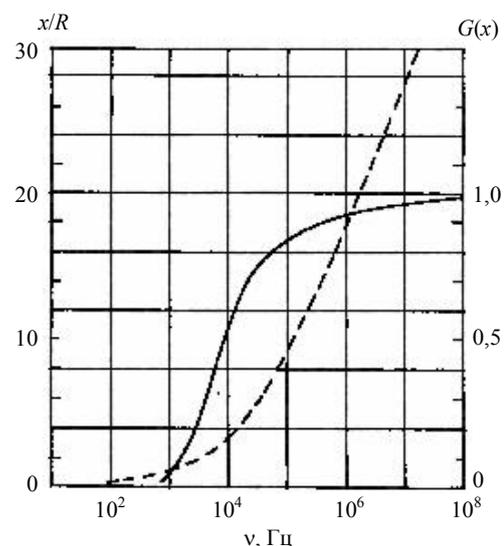


Рис. 1. Зависимость параметра x/R (---) и функции $G(x)$ (—) от частоты тока, питающего катушку [6]

Результаты эксперимента и их интерпретация

На рис. 2 приведены значения величины силы, отталкивающей катушку диаметром 52 мм от мед-

ной пластины при различных значениях тока I_c и различных исходных расстояниях ее от пластины. Как видно, в соответствии с формулой (3) экспериментальные точки достаточно хорошо аппроксимируются кривыми типа $F = mI_c^2$. Несоответствие кривых и экспериментальных точек при больших значениях величины тока объясняется заметным смещением катушки от пластины и соответствующим уменьшением силы, действующей на катушку.

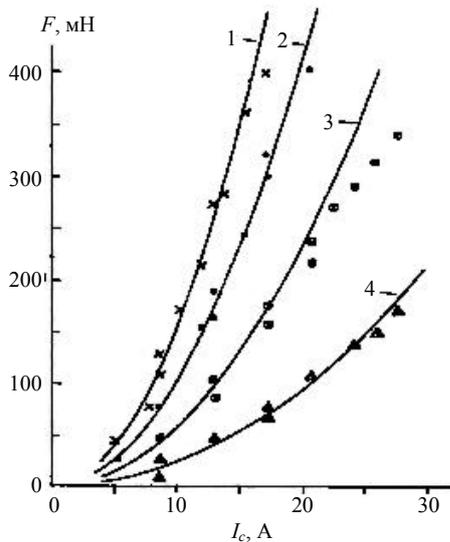


Рис. 2. Зависимость силы F , действующей на катушку диаметром 52 мм на частоте 440 кГц, от тока I_c при различных расстояниях l края катушки от пластины: 1 — $l = 2,9$ мм; 2 — $l = 4,0$ мм; 3 — $l = 6,2$ мм; 4 — $l = 13,5$ мм. Сплошные линии: 1 — $F = 0,15 I_c^2$; 2 — $F = 0,10 I_c^2$; 3 — $F = 0,057 I_c^2$; 4 — $F = 0,023 I_c^2$

На рис. 3 показано, как меняется сила F , отталкивающая катушку, от расстояния l до медной пластины. Приведены данные для трех значений тока, текущего через катушку: $I_c = 13,0$; 20,8 и 26,0 А. Экспериментальные значения аппроксимированы кривыми, построенными по формулам:

$$\begin{aligned} F_1 &= 1,379 \cdot 10^7 / (4,60 + l)^7 \text{ мН}, \\ F_2 &= 1,623 \cdot 10^7 / (4,17 + l)^7 \text{ мН}, \\ F_3 &= 3,675 \cdot 10^7 / (4,50 + l)^7 \text{ мН}. \end{aligned} \quad (4)$$

Как видим, в соответствии с формулой (3) сила F уменьшается обратно пропорционально седьмой степени величины расстояния l (см) от края катушки, к которому добавлена постоянная величина, примерно равная внутреннему диаметру катушки. Интересно, что кривые, построенные по более точной формуле (2) $F \sim y / (1 + y^2)^4$, где $y = (l + 5,5 \text{ мм}) / 26 \text{ мм}$, предсказывают более медленное уменьшение силы F с расстоянием l . Для кривой 2

напряжение U_c на катушке составляло 220 В, ток был равен $I_c = 20,8$ А и, соответственно, мощность $P = U_c \cdot I_c = 4,6$ кВт.

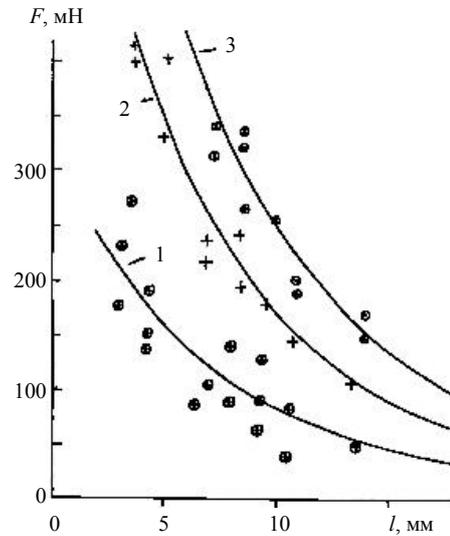


Рис. 3. Зависимость силы, действующей на катушку диаметром 52 мм на частоте 440 кГц, от расстояния l от пластины для значений тока: 1 — 13 А; 2 — 20,8 А; 3 — 26 А. Сплошные линии построены по формулам (4)—(6)

В таблице приведены найденные по формуле (3) значения величины силы F , отталкивающей катушку диаметром $d_c = 52$ мм от медной пластины при мощности $P = 4,6$ кВт и частоте тока 440 кГц при различных значениях величины l . Как видим, на расстояниях, равных 2—3 диаметрам катушки, сила отталкивания составляет сотые и тысячные доли миллиньютон.

Расчет силы

l , см	d_c/l	F , мН
1,0	0,2	164,40
2,0	0,4	47,68
3,0	0,6	16,66
4,0	0,8	6,68
5,0	1,0	2,98
10	2,0	0,14
15	3,0	0,017
20	4,0	0,0034
25	5,0	0,00090
30	6,0	0,000298
35	7,0	0,000115
40	8,0	0,000049

Как уже отмечалось, увеличение частоты радиоизлучения выше 10^6 Гц не должно приводить к заметному росту силы, отталкивающей катушку от проводника. Кроме этого, длина волны этого радиоизлучения должна быть заметно больше диаметра катушки, поскольку формула (2) выведена в предположении мгновенного взаимодействия по-

лей индуцирующих и индуцированных токов. Все сказанное остается справедливым, если считать ШМ излучателем, эквивалентным катушке, диаметр которой равен диаметру ШМ. Предположение о существовании электромагнитного излучения ШМ в диапазоне сантиметровых и миллиметровых волн помогает объяснить случаи ее теплового воздействия на объекты (например, спекание почвы [7] или нагрев стекла [8]), однако механизм генерации этого излучения пока остается неисследованным. Так, согласно электродинамической модели ШМ [5], интенсивность радиоизлучения протонов составляет всего около 10^{-1} Вт. Известно также, что мощность синхротронного излучения электронов на частоте их вращения в 10^2 — 10^3 раз меньше мощности излучения в видимом диапазоне спектра [9]. Поэтому, если мощность видимого излучения будет равна 10^2 — 10^3 Вт, мощность радиоизлучения электронов не будет превышать нескольких ватт. Таким образом, на основе результатов измерений авторы признают, что из-за короткодействия и относительно небольшой величины силы взаимодействия вихревых токов она не может послужить причиной левитации ШМ над проводящими поверхностями на высотах, равных нескольким ее диаметрам. Это заставляет нас искать другие способы объяснения этого явления.

Альтернативные способы объяснения движения шаровой молнии

Имеются сообщения о том, что иногда ШМ движется вдоль поверхности Земли, отскакивая от нее “как резиновый мяч” [10] или как “воздушный шарик” [11]. Такой тип движения ШМ можно объяснить без привлечения гипотезы взаимодействия вихревых токов. Согласно [3, 5], ШМ имеет упругую оболочку, которая, с одной стороны, стремится стянуться под действием неоднородного электрического поля, создаваемого электрическим зарядом находящегося внутри нее энергетического ядра, а, с другой — растягивается из-за расширения этого ядра. Поэтому ее поведение при ударе о Землю можно считать аналогичным поведению резинового мяча. Сила F_{st} , растягивающая оболочку с внутренним радиусом R при наличии заряда энергетического ядра Q , описывается формулой [5, формула (5)]:

$$F_{st} = \frac{2W_p}{R} + \frac{2Q^2}{8\pi\epsilon_0 R^2},$$

где W_p — энергия, запасенная в ядре в виде кинетической энергии положительных ионов.

Разделив F_{st} на площадь внутренней поверхности оболочки $S = 4\pi R^2$, находим величину давления ядра на оболочку:

$$P = \frac{1}{2\pi R^3} \left[W_p + \frac{Q^2}{8\pi\epsilon_0 R} \right].$$

При ударе о Землю расстояние от центра шара до поверхности Земли уменьшается на величину $h = \alpha R$, а оболочка в месте прилегания к Земле приобретает форму круга радиусом

$$r = R(2\alpha - \alpha^2)^{1/2}.$$

Площадь этого круга $s = \pi r^2 = \pi R^2(2\alpha - \alpha^2)$. При $\alpha \ll 1$ получаем $s = 2\alpha\pi R^2$. Сила, с которой ядро давит на круглый участок оболочки площадью s :

$$F_s = Ps = \frac{\alpha}{R} \left(W_p + \frac{Q^2}{8\pi\epsilon_0 R} \right). \quad (5)$$

С такой же силой на ШМ будет действовать поверхность Земли, стремящаяся оттолкнуть ШМ от себя. Сравним величину силы F_s с силой электростатического притяжения F_{at} заряда Q к Земле и весом шаровой молнии F_g . Для этого обратимся к случаю ШМ с внутренним радиусом $R = 3$ см и толщиной оболочки $a = 1$ см, проанализированному в статье [5]. Из графиков, приведенных в [5], можно найти, что ШМ указанных размеров при энергии $(W_p)_7 = 10^3$ Дж имеет заряд $Q_7 = 10^{-6}$ Кл, при $(W_p)_8 = 10^4$ Дж — $Q_8 = 10^{-5}$ Кл, при $(W_p)_9 = 10^5$ Дж — $Q_9 = 10^{-4}$ Кл и при $(W_p)_{10} = 10^6$ Дж — $Q_{10} = 10^{-3}$ Кл. (Здесь цифровые индексы означают номера кривых на графиках рис. 4 статьи [5]). Подставляя в формулу (5) $R = 3 \cdot 10^{-2}$ м, получаем:

$$F = 33,33\alpha(W_p + 1,498 \cdot 10^{11} Q^2). \quad (6)$$

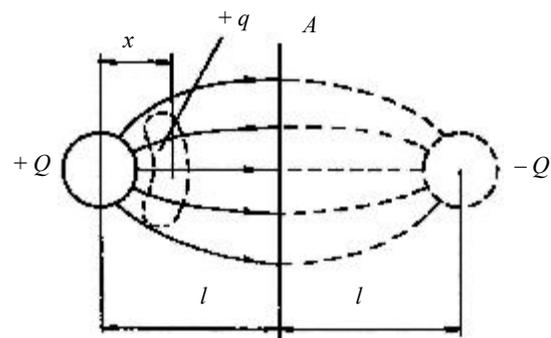


Рис. 4. Схема взаимодействия шаровой молнии с проводящей поверхностью:

+Q — шаровая молния; -Q — зеркальное отражение заряда ШМ; +q — объемный заряд

Из (6) находим: $F_7 = 3,333 \cdot 10^4 \alpha$, $F_8 = 3,338 \cdot 10^5 \alpha$, $F_9 = 3,383 \cdot 10^6 \alpha$ и $F_{10} = 3,832 \cdot 10^7 \alpha$. Сравним полученные значения силы отталкивания с силой электростатического притяжения заряда Q , находящегося на расстоянии $l = 2(R + a) = 8$ см от проводящей поверхности. Согласно формуле (1) $(F_{at})_7 = 0,35$ Н, $(F_{at})_8 = 35,1$ Н, $(F_{at})_9 = 3,51 \cdot 10^3$ Н

и $(F_{at})_{10} = 3,51 \cdot 10^5$ Н. Разделив $(F_{at})_n$ на $(F)_n$, находим $\alpha_7 = 1,05 \cdot 10^{-5}$, $\alpha_8 = 1,05 \cdot 10^{-4}$, $\alpha_9 = 0,04 \cdot 10^{-3}$ и $\alpha_{10} = 1,916 \cdot 10^{-2}$. Таким образом, для того чтобы при ударе сила отталкивания ШМ превысила силу притяжения, нужно, чтобы ее радиус уменьшился на величину от 1 до 10^{-3} %.

Объем оболочки ШМ с внутренним радиусом $R = 3$ см и толщиной $a = 1$ см равен $V_{en} = 4/3 [(R+a)^3 - R^3] = 155$ см³. Если плотность оболочки принять равной плотности воды, то ее масса будет равна 0,155 кг, а сила тяжести — 1,52 Н. Задача компенсации силы тяжести при ударе может возникнуть только для малоэнергетичных ШМ (с энергией около 1 кДж). Для этого потребуются дополнительное уменьшение радиуса оболочки на несколько тысячных процента. Для высокоэнергетичных ШМ сила тяжести равна лишь небольшой части силы F_{at} и ее можно не учитывать.

Некоторые исследователи высказывали предположение, что причиной, обеспечивающей левитацию ШМ, может быть сила, аналогичная силе реактивной струи, поднимающей ракету [1, 2]. В качестве такой струи может выступать поток вещества ШМ или ее излучения, выбрасываемый в направлении проводника.

Рассмотрим эту идею применительно к электродинамической модели ШМ [5]. Согласно этой модели ШМ представляет собой объект, ядро которого имеет положительный заряд $Q = 10^{-6}—10^{-1}$ Кл. Часть этого заряда, проникая через вакуумный зазор между ядром и оболочкой и сквозь оболочку, непрерывно стекает в атмосферу. В случае, если скорость потери заряда лимитируется проводимостью вакуумного промежутка, максимальная сила тока, стекающего с оболочки ШМ, определяется проводимостью атмосферного воздуха $\lambda_a = 3,5 \times 10^{-14}$ (Ом·м)⁻¹ и величиной заряда Q [5]:

$$I_a = \frac{\lambda_a Q}{\epsilon_0}.$$

При $Q = 10^{-1}$ Кл $I_a = 0,4 \cdot 10^{-3}$ А. При том же значении заряда потенциал U_r на поверхности сферы радиусом $r = 10$ см равен $U_r = Q/(4\pi\epsilon_0 r) = 9 \cdot 10^9$ В. Вероятнее всего, что протон, просочившийся сквозь оболочку ШМ на ее поверхность, присоединится к молекуле воды и образует ион H_3O^+ . Этот ион довольно быстро соберет вокруг себя несколько молекул воды, в результате чего образуется кластер $H_3O^+ \cdot nH_2O$. Положим для определенности $n = 3$, в этом случае масса кластера будет равна $m_i = 1,22 \cdot 10^{-25}$ кг, а его заряд $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл. Предположим, что сфера находится в вакууме и кластер $H_3O^+ \cdot 3H_2O$ уходит с ее поверхности в бесконечность. При этом он приобретет энергию $w_i = U_r \cdot e = 9 \cdot 10^9$ эВ = $1,44 \cdot 10^{-9}$ Дж. Считая частицу нереля-

тивистской, находим ее скорость $v = (2w_i/m_i)^{1/2} = 1,54 \cdot 10^8$ м/с. Импульс ионного кластера $p_i = m_i \cdot v = 1,87 \cdot 10^{-17}$ кг·м·с⁻¹. Согласно закону сохранения импульса такой же по величине импульс передается поверхности сферы. При токе $0,4 \cdot 10^{-3}$ А за секунду поверхность сферы покидают $n_i = I_d/e = 2,5 \cdot 10^{15}$ ионов, передавая ей импульс $P_i = p_i \cdot n_i = 4,7 \cdot 10^{-2}$ кг·м·с⁻¹. Импульс P_i численно равен силе F_i , действующей на сферу; согласно нашей оценке она равна $4,7 \cdot 10^{-2}$ Н.

Если заряженная сфера находится вдали от проводящих тел, электрическое поле вблизи ее поверхности однородно (плотность силовых линий, выходящих с ее поверхности, везде одинакова), поэтому векторная сумма импульсов, переданных различным участкам ее поверхности, будет равна нулю. Напротив, если вблизи заряженной сферы окажется проводник, то за счет наведения в нем зарядов противоположного знака равномерность распределения силовых линий на поверхности сферы нарушится: можно вообразить себе случай, когда практически все силовые линии будут исходить из части поверхности сферы, обращенной к проводнику. В этом случае сила F_i будет действовать только на половину сферы, повернутую к проводнику, что вызовет отталкивание сферы от металлического предмета. Однако эта сила все же оказывается недостаточной для удержания заряженной сферы на некотором расстоянии от проводника. Действительно, предположим, что произошло локальное увеличение проводимости воздуха в $10—10^3$ раз, в связи с чем ток I_a вырос до $0,4 \cdot 10^{-2}—0,4$ А. Это приведет к увеличению силы F_i до значений $0,47—47$ Н. Силе F_i противодействует сила F_{at} , определяемая формулой (1). При заряде $Q = 10^{-3}$ Кл и расстоянии от центра сферы до проводника $l = 0,5$ м сила $F_{at} = 9 \cdot 10^3$ Н, что значительно превышает величину “реактивной силы” F_i .

Причина такого “неэффективного” действия на заряд Q удаляющихся от него ионов кроется в кратковременности пребывания иона вблизи поверхности сферы. Ион оказывает заметное воздействие на сферу лишь когда он находится рядом с ней, а на большом расстоянии их заряды практически не взаимодействуют. Поэтому если бы удалось остановить ионы и накопить некоторое их количество недалеко от поверхности сферы, можно было бы ожидать, что сила взаимодействия заряженной сферы с этим объемным зарядом увеличится. К счастью, именно это происходит, когда в атмосфере вблизи проводников при больших значениях напряженности электрического поля имеет место разряд, называемый коронным разрядом [12]. При коронном разряде в ограниченной области пространства вблизи электрода (в зоне иониза-

ции) происходят ионизация и возбуждение газа лавинами электронов. Во внешнюю зону из зоны ионизации движется поток носителей заряда, знак которых совпадает со знаком заряда электрода. Образующийся в результате этого объемный заряд тормозит дальнейшее развитие процессов ионизации, ослабляя поле вблизи ионизирующего электрода. Это приводит к локализации зоны ионизации вблизи электрода.

Рассмотрим поведение положительно заряженной шаровой молнии, центр которой расположен на расстоянии l от проводящей пластины A (см. рис. 4). Пусть заряд ШМ равен Q . Предположим, что благодаря коронному разряду в пространстве между ШМ и пластиной появилось облако объемного заряда q , центр которого удален от центра ШМ на расстояние $x < l$. В этом случае сила, действующая на ШМ, будет определяться векторной суммой силы F_{at} , притягивающей ее к пластине, и силы F_q взаимодействия одноименных зарядов Q и q , отталкивающей ШМ от проводника:

$$F_{\Sigma} = F_q - F_{at} = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0} \left(\frac{q}{x^2} - \frac{Q}{4l^2} \right).$$

Шаровая молния будет находиться в состоянии равновесия, если $F_{\Sigma} = 0$, отсюда следует условие $4ql^2 = Qx^2$. Определив x как $x = \gamma l$ ($\gamma < 1$), получаем $q = Q\gamma^2/4$. Положив $\gamma = 10^{-1}$, находим $q = 2,5 \cdot 10^{-3} Q$. При $Q = 10^{-1}$ Кл $q = 2,5 \cdot 10^{-4}$ Кл. При величине тока, стекающего с оболочки ШМ, $I_a = 4 \cdot 10^{-4}$ А этот заряд может накопиться за время $t_q = q/I_a = 0,6$ с. Носителями объемного положительного заряда q , по-видимому, являются ионные кластеры $H_3O^+ \cdot nH_2O$. Если объемный заряд $q = 2,5 \cdot 10^{-4}$ Кл будет занимать область, размеры которой составляют 10 % объема ШМ радиусом $R = 0,1$ м, плотность положительных ионов в ней будет равна $n_+ = 30q/(4\pi eR^3) = 3,73 \cdot 10^{18}$ м $^{-3}$. При этом степень ионизации воздуха составит $\beta = n_+/n_0 = 1,4 \cdot 10^{-9}$. (Здесь n_0 — число молекул воздуха в 1 м 3 , $n_0 = 2,68 \cdot 10^{27}$ м $^{-3}$). Стационарная концентрация ионов в области существования объемного заряда будет поддерживаться благодаря конкуренции процессов образования ионов за счет их эмиссии с поверхности ШМ и их ухода из этой области из-за проводимости воздуха. Электростатическая сила F_{at} (1) и сопоставимая с ней по величине сила F_q намного превышают силу тяжести F_g и архимедову силу F_{ar} . Так, при массе ШМ $M_{bl} = 1$ кг $F_g = 10$ Н, а архимедова сила для ШМ объемом 1 дм 3 равна 10^2 Н, поэтому указанные силы в расчетах можно не учитывать.

Примером механического действия коронного разряда может служить электрическая вертушка, состоящая из пары заостренных электродов, расположенных на концах стержня, способного вра-

щаться вокруг оси, проходящей через его середину. При подаче на электроды высокого напряжения вблизи их острых концов появляется коронный разряд, и устройство начинает вращаться вокруг оси. Общепринятым объяснением этого эффекта считается появление реактивной силы за счет “электрического ветра”, сдувающего газ с концов электродов. Но, как было показано выше, реактивная сила не является основным фактором, вызывающим движение вертушки. Более сильное воздействие может оказать образование вблизи острия объемного заряда, знак которого совпадает со знаком заряда электрода.

Еще более впечатляющей демонстрацией сил, возникающих при коронном разряде, служат опыты Джорджа Пигготта (George S. Piggott), проведенные им в 1904 г. [13]. С помощью электростатического генератора, помещенного в кожух (в котором поддерживалось давление 3 атм), Пигготт смог зарядить металлический шар радиусом $R_b = 5$ см до напряжения 500 кВ. При таком напряжении вокруг шара возникало свечение коронного разряда, занимающее область диаметром около 20 см. Когда в электрическое поле шара вносился небольшой металлический шарик, то он сначала притягивался к большому шару, приближаясь к его поверхности до расстояния 1 мм, затем он опускался вниз к заземленному электроду и, не доходя до него 10 см, снова устремлялся к заряженному шару. На этот раз его расстояние до поверхности шара уже было не меньше 5 см. Совершая затухающие колебания в вертикальном направлении, шарик в конце концов зависал на расстоянии около 25 см от центра большого шара (рис. 5). В опытах использовались серебряные шарики диаметром 11 мм и массой 1,3 г. К верхней и нижней частям подвешенного шарика примыкали две зоны свечения длиной около 1 см, занимающие примерно половину площади верхней и нижней полусфер шарика. Интересно, что в этой системе была возможна левитация и второго шарика, который располагался сбоку от ее вертикальной оси.

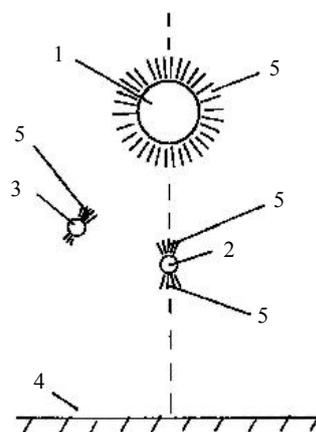


Рис. 5. Схема опыта Дж. Пигготта [13]:

- 1 — металлический шар диаметром 10 см;
- 2, 3 — серебряные шарики диаметром 11 мм и массой 1,3 г;
- 4 — заземленный электрод;
- 5 — зоны коронного разряда

Без привлечения гипотезы образования объемного заряда объяснить наблюдаемые явления не представляется возможным. Действительно, если бы они были вызваны только электростатическими силами, должен был наблюдаться циклический процесс, первой фазой которого было бы притяжение к большому шару маленького шарика, поляризованного в неоднородном поле первого. После этого, получив заряд при близком контакте с большим шаром, шарик должен был оттолкнуться от него. Через некоторое время, когда заряд шарика стечет в атмосферу, процесс должен был повториться. Эксперимент показывает, что именно так ведут себя небольшие тела вблизи заряженного шара, если напряженность электрического поля вблизи тела недостаточно высока для развития коронного разряда. При достижении условий образования коронного разряда на некотором расстоянии от шарика на оси, соединяющей его центр с центром большого шара, должны появиться две области объемного заряда. Если большой шар будет заряжен положительно, то верхняя часть шарика зарядится отрицательно, и примыкающий к ней объемный заряд тоже будет отрицательным. Заряд нижней части шарика и объемного заряда снизу от шарика будет положительным. Равновесие шарика будет поддерживаться балансом сил: с одной стороны, силы тяжести и силы его отталкивания от отрицательного объемного заряда вызывают движение шарика вниз, а с другой — силы, пропорциональные градиенту электрического поля, и силы, отталкивающие шарик от положительного объемного заряда, стремятся поднять шарик вверх.

Положение шарика на расстоянии, приблизительно равном половине расстояния между большим шаром и заземленным проводником, устойчиво. Действительно, при приближении шарика к большому шару растут величина отрицательного объемного заряда и, соответственно, сила, заставляющая шарик двигаться вниз. При уменьшении расстояния между шариком и заземленным проводником растет величина положительного объемного заряда, что заставляет шарик подняться вверх. Не совсем понятно, однако, почему в этой системе возможен подвес шарика сбоку от вертикальной оси, поскольку вектор силы тяжести шарика имеет составляющую, направленную к оси системы. Вероятнее всего, для объяснения этого нужно учесть взаимодействие бокового шарика с полями объемных зарядов шарика, расположенного на оси.

Электрическая емкость большого шара, использованного в опытах Пигготта, была равна $C_b = 4\pi\epsilon_0 R_b = 5,56 \cdot 10^{-12}$ Ф, при потенциале $U_b = 5 \cdot 10^5$ В шар имел заряд $Q_b = C_b \cdot U_b = 2,78 \cdot 10^{-6}$ Кл. При такой величине заряда он был способен компенсировать силу тяжести маленького шарика $F_g = mg = 1,3 \cdot 10^{-2}$ Н, находящегося от него на расстоянии, равном пяти

его радиусам. Поскольку заряд ШМ может превышать заряд шара Пигготта в 10^2 — 10^4 раз [1—3], можно ожидать, что и сила ее взаимодействия с проводящими телами может увеличиться до 1,3—130 Н.

Аналогичный описанному опыт по имитации левитации ШМ в электрическом поле провели авторы работы [14]. В качестве модели ШМ они использовали сферу диаметром 12 см и массой 0,03 г, изготовленную из микропроволоки диаметром 20 мкм. Сферу помещали в электрическое поле плоского конденсатора. При напряженности электрического поля больше 10^5 В/м на поверхности сферы возникал коронный разряд, и она зависала на некоторой высоте над нижним заземленным электродом.

Выводы

Как показали опыты, процесс индуцирования вихревых токов в проводниках не может послужить основой обеспечения левитации ШМ над проводящими поверхностями на расстояниях, сравнимых с ее диаметром, и объяснить отражение ШМ от Земли при ударе. Причинами этого являются малый радиус действия электромагнитных сил взаимодействия токов и относительно небольшая величина этих сил. На процесс парения ШМ диаметром несколько дециметров не может оказать влияния и архимедова сила из-за ничтожности ее величины. Импульс, передаваемый ШМ положительными ионами, эмитируемыми ее оболочкой, тоже не может вызвать появления силы, обеспечивающей ее зависание над проводниками. В связи с этим представляется, что единственной причиной, которая поддерживает движение ШМ над поверхностью проводника, может быть взаимодействие объемного заряда коронного разряда с зарядом ШМ.

Авторы выражают благодарность Н. И. Стоенко за помощь в подготовке эксперимента.

Литература

1. *Stenhoff M.* Ball Lightning. An Unsolved Problem in Atmospheric Physics. — N.Y.: Kluwer/Plenum, 1999.
2. *Барри Дж.* Шаровая молния и четочная молния. — М.: Мир, 1983.
3. *Никитин А. И.* // Электричество. 1998. № 11. С. 14.
4. *Никитин А. И.* // Электричество и жизнь. 2000. № 1. С. 32.
5. *Никитин А. И.* // Химическая физика. 2006. Т. 25. № 3. С. 38.
6. *Okress E. C., Wroughton D. M., Comenetz G. et al.* // J. of Appl. Physics. 1952. V. 23. No. 5. P. 545.
7. *Дмитриев М. Т., Бахтин Б. И., Мартынов В. И.* // ЖТФ. 1981. Т. 51. Вып. 12. С. 2567.
8. *Nikitin A. I., Bychkov V. L., Nikitina T. F., Velichko A. M.* // Proc. 8th International Symposium on Ball Lightning (ISBL'04). 2004. Chung-li, Taiwan. P. 23.
9. *Тернов И. М., Михайлин В. В., Халилов В. П.* Синхротронное излучение и его применения. — М.: Изд-во МГУ, 1980.

10. Григорьев А. И. Шаровая молния. — Ярославль: Изд-во ЯрГУ, 2006.

11. Бычков В. Л., Бычков А. В., Бычков Д. В.: Матер. 10-й Росс. конф. по холодной трансмутации ядер хим. элементов и шаровой молнии. Дагомыс, Сочи. 2002. — М: НИЦ “Эрзион”, 2003. С. 109.

12. Канцов Н. А. Коронный разряд. — М.–Л.: Гос. изд-во физ.-теор. лит-ры, 1947.

13. Ford R. A. Homemade Lightning: Creative Experiments in Electricity. — N. Y.: Mc Graw-Hill, 2002.

14. Александров В. Я., Подмошеский И. В., Салль С. А. // ЖТФ. 1990. Т. 60. Вып. 1. С. 73.

Role of eddy currents in lifting force creating for an autonomous emitter of radio-waves

A. I. Nikitin, I. O. Leipunsky, T. F. Nikitina

Institute for Energy Problems of Chemical Physics, Russian Academy of Sciences

38/2, Leninsky av., Moscow, 117829, Russia

E-mail: anikitin@chph.ras.ru

For test a hypothesis for ball lightning levitation over conductor surface due to eddy currents, induced in conductor, experiments for measuring of the force, repelling a coil from a copper plate, were conducted. The coil of diameter 5.2 cm was fed with alternating current of frequency 440 kHz at a power 4.6 kW. It was found that this force at a distance 3 cm does not exceed 0.1 N and sharply decreases at shifting of the coil from the plate. This excludes eddy currents as a reason of ball lightning hovering. A new hypothesis is proposed that ball lightning levitation may be explained by existence of corona discharge on its surface.

PACS: 41.20.Gz; 52.80.Mg; 52.80.Hc

Keywords: ball lightning, levitation, eddy currents, electric charge, corona discharge.

Bibliography — 14 references.

Received 30 July 2009