

М.И. Баранов

ПРИБЛИЖЕННЫЙ РАСЧЕТ ТЕМПЕРАТУРЫ В СФЕРИЧЕСКОЙ КОРОНИРУЮЩЕЙ МИКРОДИПОЛЬНОЙ ПОЛЯРИЗОВАННОЙ ВОДНОЙ ОБОЛОЧКЕ ШАРОВОЙ МОЛНИИ

Виконано розрахункову оцінку максимальної температури в мікродипольній макроскопічній водяній оболонці, що коронує, кульової блискавки, яка виникає в атмосферному повітрі та містить центральне макроскопічне електронне ядро з зовнішньою поляризованою водяною оболонкою, яка оточує його.

Выполнена расчетная оценка максимальной температуры в микродипольной коронирующей макроскопической водной оболочке шаровой молнии, возникающей в атмосферном воздухе и содержащей центральное макроскопическое электронное ядро с окружающей его внешней поляризованной водной оболочкой.

ВВЕДЕНИЕ

В [1, 2] автором была предложена и теоретически подкреплена соответствующими расчетными оценками новая микродипольная модель шаровой молнии (ШМ), содержащая в воздушной атмосфере центральное отрицательно заряженное макроскопическое сферической формы сплошное электронное ядро наружным радиусом r_e , окруженное снаружи макроскопической сферической электронеutralной микродипольной многослойной поляризованной водной оболочкой внешним радиусом r_0 . Выполненные в [1, 2] оценки напряженности электрического поля как внутри, так и снаружи многоячейистой микродипольной водной оболочки ШМ свидетельствуют о том, что здесь они могут достигать уровня порядка 10^{11} В/м. Из техники высоких напряжений известно, что при достижении вблизи заряженных металлических электродов, размещенных в атмосферном воздухе, напряженности электрического поля, примерно равной $3 \cdot 10^6$ В/м [3], с них начинает развиваться электрическая корона соответствующей полярности (отрицательной или положительной в зависимости от рода электрического заряда на поверхности электрода). Отметим, что, например, указанная отрицательная корона представляет собой незавершенный воздушный электрический разряд с электрода, сопровождающийся образованием с него электронных лавин, движущихся в окружающую его область воздушного пространства с уменьшающимся уровнем электрическим полем [3]. Именно уменьшение вдали от поверхности коронирующего электрода напряженности электрического поля и приводит на некотором расстоянии от нее к обрыву данных светящихся электронных лавин и прекращению их дальнейшего продвижения в воздухе. Это расстояние и определяет геометрические размеры (толщину или "чехол") светящейся области отрицательной электрической короны. В соответствии с предложенной в [1, 2] микродипольной моделью ШМ в ней с учетом наличия на торцах ее водных микродиполей связанных некомпенсированных поляризационных зарядов отрицательной и положительной полярности, наверное, будет наблюдаться как отрицательная, так и положительная корона. Причем, положительная корона может протекать только внутри микродипольной многоячейистой водной оболочки ШМ. Что касается отрицательной короны, то она бу-

дет развиваться с огромного числа водных микродиполей-ячеек как внутри сферической оболочки ШМ между ее радиально ориентированными микродиполями, так и снаружи ШМ в воздушную атмосферу с наружной многоячейистой сферической поверхности микродипольной водной макрооболочки радиусом r_0 , непосредственно обращенной к наблюдателю этого электрофизического феномена земной природы.

Несомненный научный интерес для специалистов, изучающих ШМ, представляет расчетная или при возможности экспериментальная оценка температуры в ее оболочке или ядре. На сегодня с учетом скурых опытных данных из коллекции наблюдений случайными зрителями и исследователями ШМ со всего мира (в основном описательного характера), обобщенных и приведенных в [4, 5], с физических позиций не исключается наличие в макроскопической сферической оболочке ШМ множественных жестко связанных между собой коронирующих радиально расположенных многослойных микродипольных водных микрообразований, создающих вместе своеобразный светящийся (из-за множественных локальных зон электрической короны) пространственный макрокаркас рассматриваемого вида молнии. Такая оценка может дать обоснованный ответ на принципиальную возможность существования внутри макрооболочки ШМ поляризованных водных микрочастиц, послойно образующих множественные электрически тесно взаимодействующие друг с другом коронирующие микроэлектродиполи со связанными на своих краях некомпенсированными поляризационными зарядами.

Целью данной статьи является приближенная расчетная оценка максимальной температуры в сферической коронирующей микродипольной поляризованной водной оболочке ШМ, соответствующей жестко структурированной микрокаркасной электрофизической модели этого вида молнии, ранее предложенной и рассчитанной в оценочном виде автором в [1, 2].

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ ШМ

Рассмотрим ограниченную сферическую область ШМ, размещенную в воздушной атмосфере при нормальных условиях (температура воздушной среды равна $T_0=0$ °С, а ее давление составляет около $p_0=101,325$ кПа [6]). Примем, что данная область ШМ

в своем центре содержит отрицательно заряженное сферическое электронное ядро радиусом r_e , вокруг которого расположена электронейтральная сферическая микродипольная водная оболочка радиусом $r_0 > r_e$ (рис.). Считаем, что присутствующие в микрокаркасной оболочке ШМ микрочастицы и молекулы воды имеют геометрическую форму, близкую к сфероидам с радиусом на своих краях, примерно равным радиусу r_m полярной сферической молекулы воды до воздействия на нее в воздушной атмосфере внешнего сверхсильного электрического поля и соответственно до ее дополнительной поляризации [1, 2]. Пусть водные микродиполи-сфероиды в оболочке ШМ, радиально отстоящие друг от друга и от ядра на расстоянии $2r_m$, на краях характеризуются одинаковыми электрическими потенциалами φ_{e+} и φ_{e-} противоположных знаков. Согласно [2] принимаем, что элементарный витковый ток короны $i_{k\Omega}$ и суммарный сферический коронный ток i_{kC} в рассматриваемой модели ШМ направлены по радиусу с неизменной концентрацией зарядов от электронного ядра молнии наружу в воздушное пространство, окружающее ШМ.

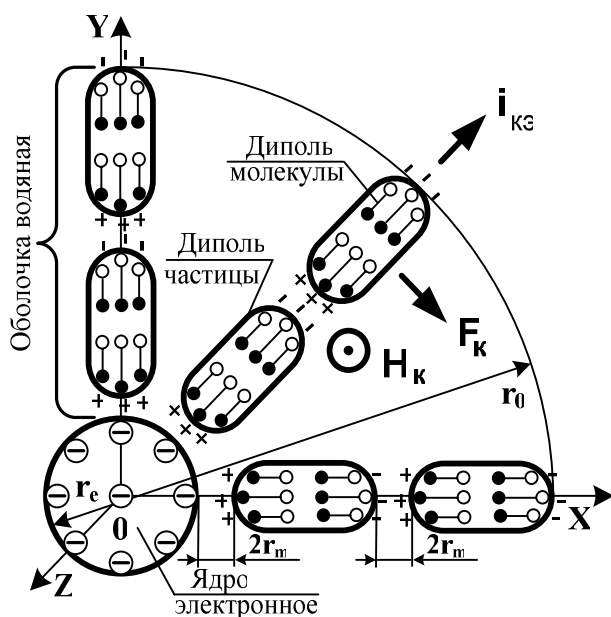


Рис. Расчетная микродипольная модель ШМ (символы H_k и F_k соответствуют напряженности собственного магнитного поля и азимутальным электродинамическим усилиям в оболочке молнии)

Считаем, что плазменные округлые каналы цилиндрической формы, образующиеся внутри и вне ШМ в результате протекания в ее множественных локальных зонах тока короны, характеризуются двумя температурами: одна T_e относится к электронному току, а другая T_i – к ионному току. Учитывая низкий уровень атмосферного давления и сравнительную быстротечность в воздушной атмосфере исследуемых тепловых процессов, для плазмы внутри и вблизи сферической области ШМ принимаем условие ее неизотермичности ($T_e > T_i$) [7]. С учетом этого остано-

вимся на определении лишь электронной температуры T_e в ярко светящихся плазменных коронных микроканалах ШМ, имеющей микрокаркасное внутреннее построение, макроскопические размеры и приближающейся к абсолютно черному телу (АЧТ) [7]. Процессами теплопередачи, теплоотдачи и излучения энергии в ШМ при решении данной теплоэлектротехнической задачи пренебрегаем.

Требуется с учетом принятых допущений и условий выполнить расчетные оценки уровня температуры свободных электронов T_e в плазме каналов коронного тока, стекающего с краев объемно распределенных сфероидальных водных микроэлектродиполей в принятой микродипольной модели ШМ с электрически жестко структурированным внутренним пространственным микрокаркасом.

2. РАСЧЕТНАЯ ОЦЕНКА УРОВНЯ ТЕМПЕРАТУРЫ В КОРОНИРУЮЩЕЙ ОБОЛОЧКЕ ШМ

Подход 1. Данный расчет температуры T_e в плазменных каналах электрической короны вне поляризованных водных микродиполей молнии построим на балансе удельных энергий в плазменных образованиях оболочки ШМ, имеем в рассматриваемом случае следующий вид:

$$n_e k_B T_e = \epsilon_0 E_k^2, \quad (1)$$

где n_e – объемная плотность (концентрация) свободных электронов в плазме коронного тока молнии, m^{-3} ; $k_B = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – постоянная Больцмана [6]; E_k – напряженность сильного электрического поля вблизи краев водных микродиполей, при которой с них в воздух (вакуум) начинается электрическая корона; $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – электрическая постоянная [6].

Тогда из (1) для искомой температуры получаем следующую расчетную формулу:

$$T_e = \epsilon_0 E_k^2 / (n_e k_B). \quad (2)$$

Из теории электромагнитного поля и физики диэлектриков следует, что при существовании вблизи краев водных поляризованных микродиполей-сфероидов со стороны внешних плазменных каналов напряженности электрического поля уровнем E_k внутри данных микродиполей электрическое поле будет характеризоваться уровнем напряженности, равным E_k / ϵ , где $\epsilon = 81$ – относительная диэлектрическая проницаемость воды [7]. С учетом этого из (2) можно получить соотношение для расчетной оценки электронной температуры T_{ed} внутри водного микродиполя ШМ, через который протекает часть элементарного виткового тока короны $i_{k\Omega}$ [2] в виде:

$$T_{ed} = \epsilon_0 E_k^2 / (\epsilon n_e k_B). \quad (3)$$

Из (2) и (3) отчетливо видно, что электронная температура T_{ed} внутри водного микродиполя с проходящим через него током короны оказывается в ϵ раз меньше температуры T_e свободных электронов в плазме внешних по отношению к нему каналов элементарного коронного тока $i_{k\Omega}$ и соответственно

суммарного коронного тока i_{kC} в ШМ, расчетные соотношения для которых автором приведены в [2].

Пример №1 расчета T_e и T_{ed} в ШМ. Из анализа расчетных формул (2) и (3) следует, что при их использовании для целей определения в ШМ рассматриваемых температур основным исходным параметром для них будет являться концентрация свободных электронов n_e в плазменных микроканалах с заряженных поверхностей водных микродиполей молнии. Согласно [3] в канале искрового электрического разряда в воздухе при нормальных атмосферных условиях величина n_e составляет примерно $1,7 \cdot 10^{22} \text{ м}^{-3}$. Данные из [8] для высоковольтного искрового электрического разряда в воде, когда давление в его подводном канале достигает значения около $4 \cdot 10^8 \text{ Па}$, говорят о том, что величина n_e в электроразрядной плазме в указанных условиях достигает численных значений около $1,8 \cdot 10^{26} \text{ м}^{-3}$. В тоже время, в соответствии с обобщенными количественно-качественными сравнительными данными для n_e в различных физических объектах, приведенными в [7], значение концентрации электронов в канале коронного разряда составляет порядка 10^{20} м^{-3} . С учетом приведенных данных для n_e примем, что в исследуемом случае концентрация свободных электронов в плазме ШМ ориентировочно равна усредненному значению $1,7 \cdot 10^{21} \text{ м}^{-3}$. Более точными данными для величины n_e в коронных каналах автор в настоящее время не располагает. Это и побудило его к сравнительному изложению ниже в рамках данного исследования иного расчета (физического подхода №2) для оценки искомым температур T_e и T_{ed} в коронирующей водной оболочке ШМ.

Далее в рамках расчетного подхода №1 примем, что исходная величина напряженности электрического поля E_k для воздушного коронного разряда в ШМ составляет известное в теории коронного разряда численное значение, равное $3 \cdot 10^6 \text{ В/м}$ [3]. После подстановки указанных исходных параметров в расчетные формулы (2) и (3) получаем, что в плазменном канале коронного разряда с поляризованных водных микродиполей электронная температура T_e оказывается равной примерно 3395 К, а внутри данных микродиполей электронная температура T_{ed} составляет лишь 42 К. Заметим, что согласно общефизической сравнительной оценке по свечению ШМ и различных видов нагретых тел (например, АЧТ, пламени свечи, электрической лампы и др.), приведенной в [5], температура излучающих объемно распределенных по сфере локальных зон в ШМ может составлять примерно 2000 К. В нашем случае температуру T_{ed} следует рассматривать как добавку к исходной температуре водных микродиполей, составляющей 0° С или $273,15 \text{ К}$ [6]. В связи с этим при радиальном протекании коронного тока в ШМ максимальная температура внутри водных микродиполей ее оболочки будет равной примерно 315 К или 42° С . Полученные приближенные расчетные оценки для T_e и T_{ed} могут свиде-

тельствовать о том, что при существовании в предложенной автором микродипольной модели ШМ множественных пространственно распределенных по сферическому объему молнии локальных светящихся коронных зон испарения образующих ее оболочку водных микрочастиц-сфероидов и соответственно быстрого разрушения водных микродипольных образований оболочки ШМ из-за тепловых явлений может и не происходить.

Подход 2. В данном варианте расчетной оценки температур T_e и T_{ed} в коронирующей оболочке ШМ будем базироваться на известном законе Стефана-Больцмана для излучаемого удельного теплового потока q_k (Вт/м^2) от АЧТ или для того же поглощаемого АЧТ теплового потока, имеющем применительно к исследуемой расчетной конструкции ШМ следующий аналитический вид [7]:

$$q_k = \pi^{-1} \sigma_c T_e^4, \quad (4)$$

где $\sigma_c = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт} \cdot (\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)^{-1}$ – постоянная Стефана-Больцмана.

Тогда из (4) для искомой электронной температуры T_e в канале коронного разряда с водных микродиполей оболочки ШМ в вакуум (воздух) можно получить следующую расчетную формулу:

$$T_e = \sqrt[4]{\pi \sigma_c^{-1} q_k}. \quad (5)$$

Величину удельного теплового потока q_k в коронном канале ШМ для (5) будем приближенно определять из следующего соотношения:

$$q_k = \delta_k \cdot U_k, \quad (6)$$

где δ_k – плотность тока в канале электрической короны ШМ; $U_k = |\varphi_{e+}| = |\varphi_{e-}|$ – придипольное напряжение, при котором протекает коронный ток в ШМ.

Учитывая крайне малые по радиусу r_k размеры отдельных цилиндрических каналов коронного тока в ШМ, величину δ_k с учетом принятой в [1, 2] пространственной структуры и геометрии в расчетной модели молнии найдем из соотношения вида:

$$\delta_k = i_{kC} / (2 \pi r_k^2 N_{\Sigma}^2), \quad (7)$$

где $i_{kC} = i_{k\Delta} \cdot N_{\Sigma} = \frac{2 \pi^3 r_e \epsilon_0 K_n^- U_k^2}{r_0 r_m [\ln(r_0 \cdot r_m^{-1})]^2}$ – полный ток элект-

рической короны в ШМ [2]; K_n^- – подвижность отрицательных ионов воздуха, окружающих микродиполи водной оболочки ШМ [2, 3]; $N_{\Sigma} = 0,5 \pi r_e r_m^{-1}$ – число элементарных круговых радиусом r_0 микродипольных витков в сферической оболочке ШМ.

Что касается возможной величины радиуса r_k в каналах тока отрицательной (положительной) короны с водных микродиполей-сфероидов ШМ, то его значение оценим на основе результатов микроплазменных исследований электроразрядных процессов в водных микропромежутках на рабочее напряжение порядка 60 В между токопроводящими гранулами овальной формы, выполненных ранее и представлен-

ных в [9], из следующего приближенного выражения:

$$r_k = 12,5 \cdot 10^{-3} \cdot r_m. \quad (8)$$

Добавим к указанным выше характеристикам электрофизических и плазменных процессов, протекающих в микродипольной оболочке ШМ, то, что согласно данным оценочных расчетов, представленных в [1, 2], для рассматриваемой здесь модели ШМ $U_k = 112$ В, $r_m = 1,925 \cdot 10^{-10}$ м, а в соответствии с [3] отрицательные ионы атмосферного воздуха могут характеризоваться усредненной подвижностью, численно равной $K_{и}^- = 1,8 \cdot 10^4$ м²/(В·с).

Пример №2 расчета T_e и T_{ed} в ШМ. Для численной оценки значений температур T_e и T_{ed} в микродипольной водной оболочке молнии на основе расчетных соотношений (5)-(8) используем следующие основные исходные данные [1-3]: $r_e = 0,01$ м; $r_0 = 0,05$ м; $U_k = 112$ В; $K_{и}^- = 1,8 \cdot 10^4$ м²/(В·с); $r_m = 1,925 \cdot 10^{-10}$ м; $r_k = 24,06 \cdot 10^{-13}$ м. Подстановка этих параметров в формулы (6) и (7) приводит к тому, что величина плотности коронного тока δ_k в исследуемой модели ШМ может достигать численного значения примерно $1,41 \cdot 10^4$ А/м² (при величине полного в ШМ тока короны $i_{kC} = 3,43 \cdot 10^{-3}$ А), а величина плотности теплового потока q_k в плазме коронного разряда с микродипольной молнией оказывается численно равной около $1,58 \cdot 10^6$ Вт/м². Для сравнения полученного значения q_k с известными отметим, что в [9] характерными значениями плотности теплового потока в искровых микроканалах длиной до 10^{-4} м (с их экспериментально подтвержденным радиусом около $25 \cdot 10^{-6}$ м) с импульсным током амплитудой до 80 А являются значения, равные около $9 \cdot 10^9$ Вт/м². В линейной молнии, протекающей между атмосферными облаками или атмосферными облаками и землей, на начальной стадии ее протекания для импульсной составляющей (компоненты А с амплитудой тока до 200 кА и длительностью до 500 мкс) тока молнии значения плотности теплового потока в канале главного разряда достигают значений около $5,79 \cdot 10^9$ Вт/м², а на завершающей стадии этого вида молнии для ее длительной составляющей (компоненты С с величиной тока до 800 А и длительностью до 1000 мс) разрядного тока значения плотности теплового потока в канале грозового разряда составляют примерно $2,65 \cdot 10^8$ Вт/м² [10]. Приведенное сравнение показывает, что полученное численное значение для q_k в оболочке ШМ не противоречит известным данным, характерным для удельных тепловых потоков в каналах слабо- и сильноточных искровых электрических разрядов.

Используя (5) и полученное выше значение $q_k = 1,58 \cdot 10^6$ Вт/м², в исследуемом случае находим, что электронная температура T_e в плазменном канале электрической короны ШМ для расчетного подхода №2 составляет значение около 3058 К. При этом электронная температура T_{ed} внутри водного микродиполя будет в 81 раз меньше чем T_e , что составит лишь

38 К. Как и для расчетного подхода №1 эта температура станет дополнительной к исходной температуре водных микродиполей в 273,15 К, что обеспечит достижение конечной температуры в водных микрообразованиях оболочки ШМ до уровня в 311 К или соответственно до 38 °С.

Анализ полученных расчетных данных для электронных температур T_e и T_{ed} в сферической водной микродипольной многослойной оболочке ШМ на основе физических подходов №1 и №2 показывает, что: во-первых, они достаточно хорошо взаимно коррелируют; во-вторых, электронная температура T_e в плазме пространственно распределенных по сферическому объему молнии локальных микрозон коронных разрядов рассматриваемой микродипольной модели ШМ составляет в среднем примерно 3200 К; в-третьих, электронная температура T_{ed} внутри водных микродиполей оболочки ШМ не превышает уровня 320 К; в-четвертых, достигаемый уровень электронной температуры T_{ed} указывает на температурную устойчивость водных микродиполей оболочки ШМ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баранов М.И. Шаровая молния – мощный природный молекулярный накопитель атмосферного электричества. Новая гипотеза происхождения и теория электрофизического феномена // Электротехника і електромеханіка.- 2008.- №6.- С. 75-83.
2. Баранов М.И. Усовершенствование электрофизической модели шаровой молнии с электронным ядром, микродипольной водной оболочкой и электродинамика ее электрических зарядов // Электротехніка і електромеханіка.- 2009.- №2.- С. 78-81.
3. Техника высоких напряжений/ Под ред. Г.С. Кучинского.- СПб.: Изд-во ПЭИПК (Рос. Федерация), 1998.-700 с.
4. Ohtsuki Y.H. Science of ball lightning.- Singapore: World Science, 1989.-340 p.
5. Смирнов Б.М. Физика шаровой молнии// Успехи физических наук.-1990.-Т. 160.-Вып. 4.-С. 1-45.
6. Кухлинг Х. Справочник по физике/ Пер. с нем.- М.: Мир, 1982. - 520 с.
7. Кузьмичев В.Е. Законы и формулы физики/ Отв. ред. В.К. Гарткаковский.- Киев: Наукова думка, 1989.- 864 с.
8. Гулый Г.А. Научные основы разрядно-импульсных технологий.- Киев: Наукова думка, 1990.-208с.
9. Щерба А.А., Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н. Исследование электроэрозионных явлений при протекании импульсного тока между токопроводящими гранулами с учетом микроплазменного контактного промежутка // Технічна електродинаміка.-2002.-№2. - С. 3-7.
10. Баранов М.И., Носенко М.А. Двумерная электротепловая задача для металлической обшивки летательного аппарата при воздействии на нее молнии // Электротехніка і електромеханіка.- 2007.- №4.- С. 57-63.

Поступила 01.09.2008

Баранов Михаил Иванович, д.т.н., с.н.с.
НИПКИ "Молния" Национального технического университета "Харьковский политехнический институт"
Украина, 61013, Харьков, ул. Шевченко, 47,
НИПКИ "Молния" НТУ "ХПИ"
тел. (057) 707-68-41, факс (057) 707-61-33,
e-mail: eft@kpi.kharkov.ua