

## О ПРИРОДЕ ОБРАЗОВАНИЯ ПРИ ГРОЗОВОЙ АКТИВНОСТИ АТМОСФЕРЫ ПЛАЗМЕННЫХ СТРУКТУР ТОРОИДАЛЬНОГО ВИДА

© Г.К.Тумакаев

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,  
194021 Санкт-Петербург, Россия  
(Поступило в Редакцию 22 февраля 1995 г.)

В рамках общеизвестных положений физики слаботоочного газового разряда и физики многослойных диэлектриков вскрыт механизм возникновения и объяснена причина длительного существования одной из разновидностей шаровой молнии — тороидальных плазменных образований. Показана возможность экспериментальной реконструкции этого явления в лабораторных условиях.

Среди многочисленных форм проявления атмосферного электричества широко известны случаи наблюдения устойчивых плазменных образований тороидального вида [1–3]. Они обычно описываются очевидцами как одна из разновидностей шаровой молнии. Однако в отличие от парящих в воздушном пространстве шаровых молний [1,4] такие структуры, как правило, возникают на поверхности земли или на поверхностях диэлектрических элементов бытовых и технических сооружений, например на стеклах оконных рам, на прозрачных фонарях самолетов. Их появление регистрируется как вне, так и внутри конструкций, в том числе и в объемах, почти полностью заэкранированных металлической оболочкой [5,6].

Время наблюдения тороидальных образований коррелирует с периодом высокой электрической активности атмосферы. Возникновение кольцевых структур регистрируется непосредственно после разрядов линейных молний, а также в слоистых облаках, удаленных от грозовых очагов на десятки километров.

По форме эти плазменные образования представляют собой замкнутые кольцеобразные фигуры диаметром от 2–3 до 50–100 см и шириной светящейся полосы до 10 см. Отмечается факт расширения кольца во времени. Обращается внимание на наличие признаков движения плазмы в кольце. Время существования тороидальных образований исчисляется несколькими секундами.

Природа обсуждаемого феномена до настоящего времени остается неясной. Не понятен процесс “внезапного” появления кольцевых плазменных структур, как, впрочем, и шаровой молнии в закрытых

помещениях. Не находит своего объяснения и кажущаяся автономность существования этих образований от внешних источников энергии, а отсюда, как следствие, и необъяснимость их высокой энергоемкости. В естественных условиях отмечается как спокойное, так и бурное развитие (зарождение и гибель) тороидальных структур. В последнем случае предельное значение энергии плазмодов на основании данных о разрушении оконного стекла [7] оценивается величиной порядка 20 кДж.

И наконец, нет никакой ясности в вопросе об источнике питания плазменных образований в атмосфере. По этому поводу до настоящего времени с равной степенью убежденности обсуждаются две взаимоисключающие друг друга посылки. Согласно одной из них, существование этих структур обеспечивается за счет внутренней энергии [8], другой — за счет энергии подводимой извне. В последнем случае чаще предпочтение отдается источникам ЭДС, возникновение которых так или иначе связано с высокой напряженностью электрического поля в атмосфере при грозовой ее активности.

Эта идея не нова. На рубеже XX века для объяснения природы шаровой молнии она привлекалась, например, М. Теплером и Г. Планте [1,4]. Позднее, в 40–60 годах, для этих целей был привлечен СВЧ разряд. Г.И. Бабат [9], используя генератор СВЧ излучения с выходной мощностью 100 кВт, впервые воспроизводит долгоживущий высокочастотный разряд в воздухе при атмосферном давлении, а П.Л. Капица [10] развивал положение о возможности поддержания длительного существования шаровой молнии за счет поглощения направленного от грозовых туч микроволнового излучения.

Отметим, что такой подход к решению проблемы шаровой молнии до настоящего времени не дал положительного результата. Однако он был успешно реализован при объяснении природы четочной молнии.

На основе предположения, что образование четок связано с фрагментацией канала линейной молнии на завершающей, слаботочной стадии ее развития, экспериментально был воспроизведен процесс стратификации канала высоковольтной дуги при атмосферном давлении [11].

### Постановка задачи

Настоящая работа посвящена экспериментальному изучению плазменных тороидальных структур. Основное внимание уделено решению проблемы реконструкции рассматриваемого явления в лабораторных условиях и выяснению природы зарождения и длительного существования плазменных образований в замкнутых, ограниченных диэлектриком объемах.

Исследование выполнено в рамках предположений, сформулированных на основе анализа данных по шаровой и четочной молнии [1–11]: 1) тороидальные структуры (подобно четочной молнии [11]) не могут существовать автономно; 2) возникновение тороидальных структур (подобно четочным молниям [11]) связано с развитием в естественных условиях слаботочного высоковольтного газового разряда; 3) любой объект, содержащий плоские диэлектрические элементы, будь то фонарь кабины самолета или окно бытового сооружения, обладает

свойствами, присущими электрическому многослойному конденсатору [12]; действительно, диэлектрическая пластина (или оболочка), два воздушных промежутка между диэлектриком и токопроводящими (в естественных условиях преимущественно случайного происхождения) электродами в таких объектах образуют обычный трехслойный конденсатор; 4) возникновение и длительное существование “спокойных” тороидальных структур обеспечивается энергией, аккумулированной в таких многослойных системах, а развитие газоразрядных процессов в воздушных промежутках связано с токами смещения [12-14].

Если два первых предположения по сути своей просты и очевидны [11], то последние нуждаются в пояснении.

В электрическом поле эффект накопления зарядов на границах раздела в слоистых диэлектриках, когда отдельные слои отличаются друг от друга толщиной  $d$ , диэлектрической проницаемостью  $\epsilon$  и проводимостью  $\gamma$ , носит название высоковольтной, объемной или междуслойной поляризации диэлектрика и хорошо изучен.

Суть этого процесса сводится к релаксации напряженности электрического поля в каждом слое от начального его значения, определяемого диэлектрической проницаемостью  $E_i = f(1/\epsilon_i)$ , до стационарного значения  $E_i = f(1/\gamma_i)$ , при котором плотности тока проводимости в каждом слое многослойного диэлектрика оказываются равными друг другу  $j_1 = j_2 = \dots = j_n$ . Так, при зарядке двухслойного конденсатора [12] начальное значение отношения  $E_1/E_2 = \epsilon_2/\epsilon_1$  определяется исключительно диэлектрическими свойствами слоев, а по мере накопления свободных зарядов оно трансформируется до величины  $E_1/E_2 = \gamma_2/\gamma_1$ , определяемой равенством плотностей тока на границе раздела диэлектриков  $j_1 = j_2$ .

Отметим, что изменение во времени плотности тока смещения и проводимости, ответственного за накопление (абсорбцию) или сброс (десорбцию) поверхностного заряда, соответственно при зарядке и коротком замыкании двухслойного конденсатора, описывается выражением

$$j_a = \pm \frac{(\epsilon_2 \gamma_1 - \epsilon_1 \gamma_2)^2 d_1 d_2 U}{(\epsilon_1 d_2 + \epsilon_2 d_1)^2 (\gamma_1 d_2 + \gamma_2 d_1)} \exp\left(-\frac{t}{\Theta}\right),$$

где  $U$  — напряжение на обкладках конденсатора,  $\Theta$  — постоянная времени (для слюды, например,  $\Theta = 1-3$  мин [13]).

Все это остается справедливым и для трехслойного конденсатора, междуэлектродное пространство которого заполнено твердотельным диэлектриком и двумя воздушными (газовыми) прослойками.

При высокой напряженности электрического поля подобные системы в отличие от обычных конденсаторов обнаруживают ряд специфических и важных для понимания рассматриваемой проблемы особенностей. Индекс 1 соответствует газу, 2 — диэлектрику. Во-первых, так как в этом случае обычно  $\epsilon_1 < \epsilon_2$  [15] и  $d_1 > d_2$ , а в сильных электрических полях, превышающих порог пробоя газовых промежутков, также и  $\gamma_1 \gg \gamma_2$ , то распределение потенциала между слоями здесь оказывается сильно гипертрофированным. В начальный момент времени поле почти полностью оказывается сосредоточенным в газовых прослойках, что способствует интенсивному развитию газоразрядных процессов, а в стационарных условиях — на твердотельном диэлектрике.

Во-вторых, плотность тока смещения при  $t = 0$  определяется в основном проводимостью газа

$$j \Big|_{t=0} \approx \frac{\gamma_1}{d_1} U.$$

В-третьих, развитие газоразрядных процессов в воздушных промежутках многослойного конденсатора обеспечивает эффективное накопление поверхностного заряда на диэлектрике и обращает последний в автономно существующий безэлектродный аккумулятор электрической энергии. Электрическая емкость его соизмерима с емкостью конденсатора с металлическими обкладками, а заряд и запасенная в нем энергия пропорциональны соответственно  $(U - U_B)$  и  $(U - U_B)^2$ , где  $U_B$  — пробивное напряжение воздушных зазоров.

В-четвертых, накопление поверхностных зарядов в пробойном режиме работы такого конденсатора не зависит от степени развитости внешних электродов. Здесь плоские металлические обкладки с успехом могут быть заменены пространственно ограниченными электродами, например острием.

В-пятых, при пробое газовых промежутков в трехслойном конденсаторе обе поверхности диэлектрика выполняют роль активных, но разноименно заряженных электродов.

Простейшим примером организации импульсного безэлектродного газового разряда [16,17], связанного с объемной поляризацией неоднородного диэлектрика, может служить электрический пробой воздушных пор в пористых диэлектриках [13].

## Постановка эксперимента

Инициирование газоразрядных процессов и моделирование приэлектродных явлений, в том числе и тороидальных плазменных образований, при атмосферном давлении внутри замкнутого пространства осуществлялось в сферической стеклянной колбе диаметром 10 см. Это простое по конструкции сооружение по сути своей является миниатюрной моделью и фонаря самолета, и покрытых изнутри диэлектрической пленкой танков нефтеналивных судов.

Общий вид колбы, расположение электродов и электрическая схема коммутации режимов абсорбции и десорбции зарядов приведены на рис. 1.

Электрическая цепь рассматриваемой системы, так же как и предполагаемая цепь прототипа, содержит в себе два газоразрядных промежутка. Один из них находится между внутренней поверхностью колбы и впаянным в нее металлическим электродом, другой — между наружной поверхностью колбы и острием.

Конструктивно внешний электрод оформлялся либо, как это показано на рис. 1, в виде острозаточенной иглы, изготовленной из медной проволоки диаметром 2 мм, либо в виде короткого отрезка провода длиной 1–2 мм и диаметром 0.05–0.1 мм, закрепленного на внутренней стороне металлического обода, который на расстоянии 1–2 см опоясывал колбу в экваториальном либо близком к нему сечении. Отметим, что в последнем случае обод использовался только в качестве опоры для игольчатого электрода и не оказывал влияния на эволюцию исследуемых газоразрядных явлений в колбе.

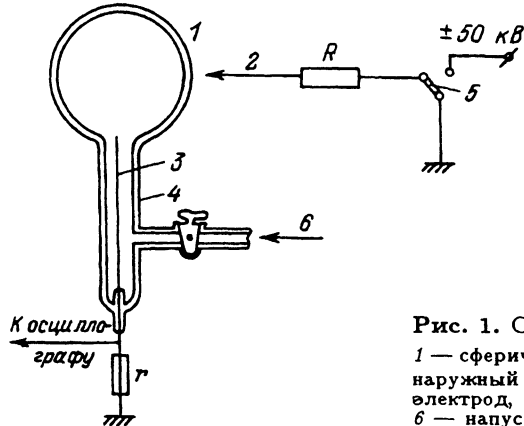


Рис. 1. Схема прибора.

1 — сферическая колба, 2 — игольчатый наружный электрод, 3 — внутренний электрод, 4 — ножка, 5 — коммутатор, 6 — напуск газа.

При моделировании разрядных явлений в заэкраированных металлом диэлектрических оболочках 80–90% поверхности стеклянной колбы плотно обжималась алюминиевой фольгой или стальной сеткой.

В обсуждаемой серии экспериментов с внешней стороны колбы была окружена атмосферным воздухом. Внутренняя полость колбы после ее предварительной откачки заполнялась до атмосферного давления разными газами, отличающимися друг от друга величиной напряженности поля при пробое: воздухом ( $E \sim 32$  кВ/см), аргоном ( $E \sim 10$  кВ/см), неоном ( $E \sim 5$  кВ/см) и смесью неона с аргоном ( $E \sim 700$  В/см) [18].

Зарядка колбы осуществлялась подачей постоянного напряжения до 50–60 кВ на внешний игольчатый электрод, разрядка — закорачиванием последнего через балластное сопротивление  $R \sim 50$ –200 МОм с внутренним, заземленным электродом. Внешняя часть электрической цепи не содержит каких бы то ни было сосредоточенных реактивных  $L$ -или  $C$ -элементов, а длина монтажных проводов не превышает 1–1.5 м.

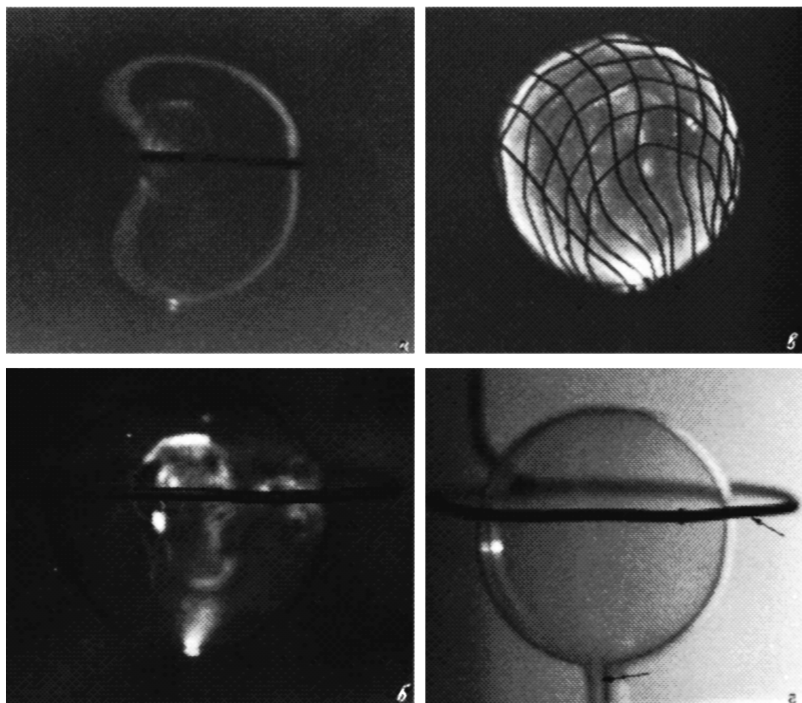
Исследование проводилось, хотя это из-за обратимости процессов и непринципиально, в десорбционном режиме. Полярность внутренней поверхности колбы, а следовательно, и отводимая ей роль анода или катода задавались полярностью напряжения, подаваемого на внешний электрод при зарядке системы.

Изменение во времени силы тока в цепи разряда по падению напряжения на нагрузке  $r = 1$  кОм регистрировалось с помощью осциллографа. Эволюция светимости плазмы в колбе отслеживалась визуально, а отдельные наиболее характерные ее фрагменты фиксировались с помощью фото- и видеоаппаратуры.

## Экспериментальные результаты

Несмотря на ограниченные размеры, стеклянная колба, представляющая собой по сути диэлектрический конденсатор емкостью порядка 0.001 мкФ и энергией, аккумулированной в нем, около 1 Дж,<sup>1</sup> обеспечивает поддержание в эвакуированном объеме устойчивого газоразрядного процесса в течении 2–5 с.

<sup>1</sup> Это значение может быть увеличено на 2–3 порядка за счет повышения зарядного напряжения до величины, определяемой электрической прочностью стекла [13,15], и изменением габаритных размеров исследуемого объекта.



**Рис. 2.** Формы существования газоразрядных процессов в ограниченном диэлектриком объеме.

*а* — внутренняя поверхность колбы — катод, *б* — внутренняя поверхность колбы — анод, *в* — колба с наружным металлическим экраном, *г* — фотография колбы с ободом в предразрядном режиме.

В качестве примера на рис. 2, *а-в* приведены различные формы организации приэлектродных и объемных газоразрядных процессов в колбе с обручем, заполненной неоном, когда *а* — наружный электрод — острие, внутренняя поверхность колбы — катод; *б* — то же самое, но внутренняя поверхность колбы — анод; *в* — колба с металлическим экраном.

Положение внешнего (игольчатого) и внутреннего (впаянного в колбу) электродов отмечено стрелками на фотографии колбы, приведенной на рис. 2, *г*.

В первом случае развитие прикатодных процессов приводит к образованию на внутренней поверхности колбы долгоживущей (до нескольких секунд), расширяющейся во времени кольцевой плазменной структуры. Вид тора диаметром 8–10 см с шириной светящейся полосы 5–8 мм представлен на рис. 2, *а*.

Характерной особенностью этой формы разряда, создающей полную иллюзию автономного существования тороидального образования, является чрезвычайно низкая, с трудом фиксируемая при визу-

альном наблюдении объемная светимость плазмы как внутри, так и снаружи колбы.

Заметим, что возникновение полосатой структуры свечения плазмы на катоде — явление, хорошо известное. Оно легко воспроизводится на диэлектриках при высокочастотных разрядах [13,17].

В другом случае (рис. 2, б) наряду с интенсивным свечением плазмы на внутренней поверхности колбы, которая в результате наложения чередующихся по поверхности (и во времени) отдельных всполохов, имеет характерную для анода [16] пятнистую структуру, также четко обрисовывается и объемное свечение плазмы в окрестности впаянного в колбу электрода.

В третьем случае при наличии внешнего металлического экрана протекание электроразрядных процессов внутри колбы независимо от полярности электродов носит бурный, взрывообразный характер и сопровождается интенсивным объемным и поверхностным свечением плазмы. Этот пример служит наглядной иллюстрацией того, что внешний металлический экран не всегда препятствует, но, напротив, иногда и способствует развитию в ограниченном диэлектриком пространстве разрядных явлений в наиболее активной форме их проявления.

Структура газового разряда внутри колбы зависит от рода газонаполнителя и от величины зарядного напряжения. С увеличением, например, напряжения тип его эволюционирует от искрового пробоя до формирования на внутренней поверхности колбы плазменного тора. Все это легко прослеживается в неоне или в смеси неона с аргоном, т. е. в газах с низким пробивным напряжением.

На рис. 3 для нескольких значений зарядного напряжения приведены графики изменения тока смещения  $i$  во времени при десорбции аккумулятированных на колбе зарядов. Отличительной особенностью эволюции сорбционных процессов в рассматриваемой трехслойной системе с двумя газовыми промежутками является то, что накопление или десорбция зарядов на диэлектрике обеспечивается токами смещения, изменение которых во времени носит не аperiodический, как в обычных конденсаторах, а импульсно-пробойный характер.

В режиме десорбции аккумулятированного на колбе заряда, т. е. при закорачивании внешних электродов, однократный микропробой воздушного промежутка реализуется при  $U \sim 10-12$  кВ. Это отражено на рис. 3, а. С увеличением  $U$  количество идентичных по своей структуре пробоев, а следовательно, и число регистрируемых импульсов тока возрастает. Если в диапазоне от 12 до 16 кВ скажность их следования остается бессистемной, то при больших значениях зарядного напряжения в развитии импульсного процесса обнаруживаются признаки его самоорганизации. Ранее разобщенные импульсы группируются в дуги, частота их следования становится регулярной, а в целом процесс приобретает периодически импульсный характер.

Продолжительность существования дуга микропробоев при  $U \sim 16-18$  кВ не превышает 0.5 с (рис. 3, б) и увеличивается до 1.5-2 с при  $U \sim 50$  кВ (рис. 3, в). На рис. 3, б и в устойчивый пуг с частотой следования импульсов более 1 кГц условно нанесен штриховкой, а уровень глубины модуляции сигнала обозначен сплошной линией. Вид колебательного процесса представлен на рис. 3, г, а форма единичного импульса тока длительностью около 70 мкс и амплитудой  $i \sim 1$  мА воспроизведена на рис. 3, д.

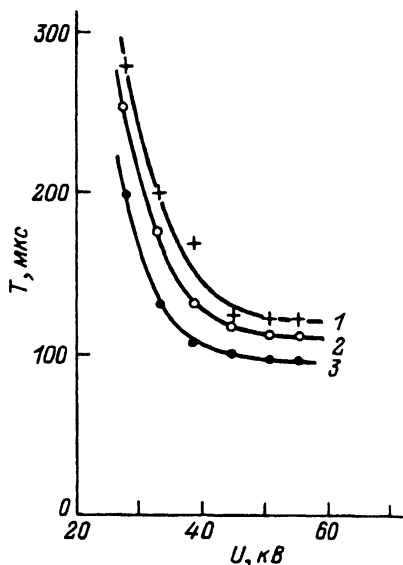
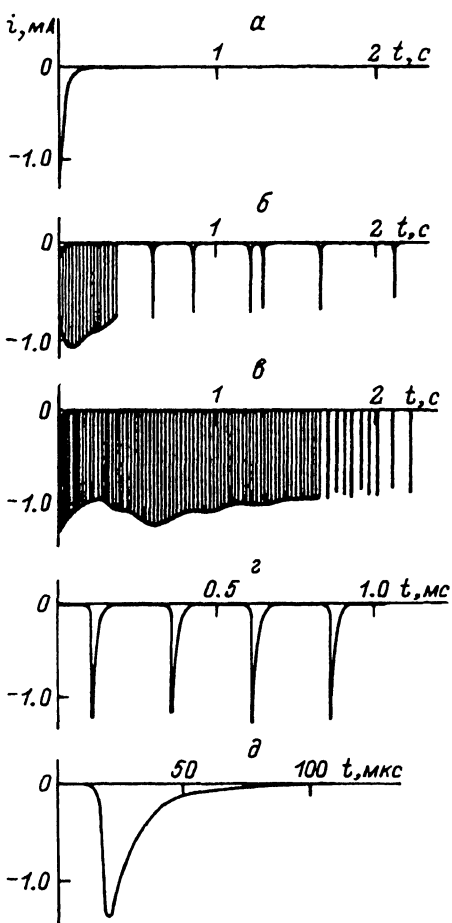


Рис. 4. Изменение  $T = f(U)$ .  
 $R, \text{МОм}$ : 1 — 200, 2 — 100, 3 — 50.

Рис. 3. Изменение  $i = f(t)$ .  
 $U, \text{кВ}$ : а — ~ 10–12, б — ~ 16–18,  
 в–д — ~ 50.

Период следования микропробоев  $T$  не остается неизменным. Он, например, сокращается с ростом зарядного напряжения  $U$  и с уменьшением величины балластного сопротивления  $R$ . График зависимости  $T = f(U, R)$  приведен на рис. 4. Максимально достигнутое в проведенных опытах значение частоты колебаний порядка 10 кГц.

Процесс формирования пуга импульсов зависит от степени заостренности внешнего электрода и его удаленности от колбы. Оптимальное расстояние 2–3 см. Отклонение от этого значения в ту или иную сторону сокращает длительность пуга. И он совсем не образуется, если игольчатый электрод вплотную приближен к колбе, а также при использовании затупленных электродов. Эти особенности, а также отмеченное ранее постоянство амплитуды тока в каждом акте пробоя, регулярность следования импульсов в пуге убедительно свидетельствуют о том, что возникновение высокочастотного колебательного процесса в электрической цепи колбы связано с инициированием на воздушном промежутке между острием и колбой вспышечного (или прерывистого) коронного разряда [16,17].



Отметим, что возникновение пробойной проводимости воздушного промежутка не зависит от полярности электродов и регистрируется как при десорбции, так и при абсорбции зарядов.

Коронный разряд на наружном воздушном промежутке преобразует ток в электрической цепи в переменный и тем самым предопределяет возможность как инициирования, так и длительного поддержания высокочастотного диффузного газового разряда емкостного типа внутри заполненной неоном колбы.

Первые признаки развития импульсного диффузного разряда — возникновение на внутренней поверхности колбы в окрестности игольчатого электрода слабосветящегося плазменного облака обнаруживаются при  $U \sim 10\text{--}12\text{ кВ}$ .

Зарождение плазменного тора диаметром до 1 см и временем жизни около 0.1 с на фоне слабосветящегося диффузного облака отмечается при  $U \sim 18\text{ кВ}$ . Момент структуризации прикатодного слоя хорошо коррелирует с зарождением дуга непрерывной последовательности микропробоев в колбе.

При разности потенциалов  $U \sim 50\text{ кВ}$  время существования тора возрастает в чистом неооне до 1–2 с, а в смеси неоона с аргоном до 5–7 с. Кольцевая структура в своем развитии от исходного состояния диаметром 2–3 см сначала непрерывно расширяется до 10 см (величины, определяемой размерами колбы), затем пересекает меридианальную плоскость и в противоположном от игольчатого электрода полушарии прекращает свое существование.

На основании анализа полученных экспериментальных данных непосредственно следует, что образование плазменных тороидальных структур в колбе, а также, возможность, и в естественных условиях обусловлено совокупностью объединенных причинно-следственной связью простых и хорошо известных явлений. Во-первых, это — иницирование в одном из газовых промежутков трехслойного конденсатора прерывистого коронного разряда: во-вторых, преобразование за счет коронного разряда электрического тока в цепи конденсатора в переменный (в импульсно-высокочастотный); наконец, в-третьих, длительное поддержание во втором газовом промежутке высокочастотного диффузного разряда.

При заполнении колбы аргоном или воздухом в отличие от неоона режим с непрерывным пугом пробоев достигнут не был. Это связано с относительно высоким значением пробивного напряжения в этих газах. В аргоне при  $U \sim 50\text{ кВ}$  реализуются лишь условия, обеспечивающие существование диффузного разряда, в в воздухе — только искрового разряда.

Однако и в этих случаях при незначительной модификации эксперимента удастся воспроизвести тороидальные структуры в замкнутом объеме. В аргоне это реализуется при замене с внешней стороны колбы атмосферного воздуха аргоном, а при заполнении колбы воздухом тор легко реконструируется с помощью искусственно вводимых в объем частиц древесного пепла. Время жизни пылевого тора и его эволюция такие же, как у плазмонов в неооне. Эти эксперименты, кроме того, позволяют выявить еще одно интересное, необнаруживаемое в опытах с неооном свойство кольцевых структур — коллективное движение взвешенных частиц по замкнутой орбите тора.

В заключение отметим, что в рамках общеизвестных положений физики слаботоочного газового разряда и физики многослойных диэлектриков при использовании в качестве источника ЭДС электрического заряда, аккумулированного на поверхности диэлектрика, воспроизведено инициирование и обеспечено длительное поддержание в ограниченном диэлектриком пространстве тороидальных плазменных структур диаметром до 10 см и временем жизни до 5 с.

Реализован процесс преобразования непосредственно в самой разрядной цепи многослойного конденсатора с газовыми промежутками тока смещения в переменный (импульсно-высокочастотный с частотой до 10 кГц) и продемонстрирована возможность одновременного существования в единой цепи на одном из промежутков высокочастотного диффузного газового разряда емкостного типа, а на другом, между острием и поверхностью диэлектрика, коронного разряда.

Показано, что возникновение плазменных образований внутри ограниченных диэлектриком объемах связано с высокочастотным диффузным газовым разрядом емкостного типа.

Идентичность всей гаммы параметров и особенностей в развитии "спокойных" тороидальных структур, наблюдаемых в естественных и в лабораторных условиях (размер, время жизни, процесс расширения тора во времени, движение частиц по замкнутой орбите тора), дают основание предполагать об успешной экспериментальной реконструкции этого явления.

Показано, что металлический экран на диэлектрической оболочке в ряде случаев не только не препятствует, а, напротив, способствует более интенсивному развитию электроразрядных процессов в ограниченных диэлектриками объемах.

Реализация газоразрядных процессов в ограниченном диэлектриком пространстве, кроме решения частной задачи, связанной с воссозданием в лабораторных условиях долгоживущих тороидальных структур, имеет прямое отношение к решению практически важной проблемы, касающейся живучести и безаварийной эксплуатации заэкранированных металлом диэлектрических объемов. Полученные результаты помогают объяснить природу таинственных взрывов танков нефтеналивных судов [19], делают понятной причину внезапного выхода из строя навигационной аппаратуры самолетов при их полетах вдали от грозových очагов [6].

Автор признателен С.В. Бобашеву, Б.Б. Дьякову и Т.П. Редько за живой интерес к работе.

#### Список литературы

- [1] Сингер С. Природа шаровой молнии. М.: Мир, 1973.
- [2] Стаханов И.П. Физическая природа шаровой молнии. М.: Атомиздат, 1979.
- [3] Смирнов В.М. // УФН. 1994. Т. 164. № 5. С. 549-551.
- [4] Барри Дж. Шаровая молния и четочная молния. М.: Мир, 1983.
- [5] Имянитов И., Тигий Д. За гранью законов науки. М.: Атомиздат, 1980.
- [6] Леонов Р.А. Загадка шаровой молнии. М.: Наука, 1965.
- [7] Колосовский О.А. // ЖТФ. 1981. Т. 51. Вып. 4. С. 856-858.
- [8] Смирнов В.М. Проблема шаровой молнии. М.: Наука, 1988.
- [9] Бабат Г.И. Вестн. электротром-сти. 1942. № 2. С. 1-12. № 3. С. 2-8.

- [10] Капица П.Л. // ЖТФ. 1968. Т. 38. Вып. 11. С. 1829–1830.
- [11] Тумакаев Г.К. // ЖТФ. 1995. Т. 65. Вып. 7. С. 52.
- [12] Сканави Г.И. Физика диэлектриков (область слабых полей). М.: ГИТТЛ, 1949.
- [13] Сканави Г.И. Физика диэлектриков (область сильных полей). М.: ГИФМЛ, 1958.
- [14] Стекольников И.С. Физика молнии и грозозащита. М.: Изд-во АН СССР, 1943.
- [15] Таблицы физических величин / Под ред. И.К. Кикоина. М.: Атомиздат, 1976.
- [16] Райзер Ю.П. Физика газового разряда. М.: Наука, 1987.
- [17] Капцов Н.А. Электроника. М.: ГИТТЛ, 1956.
- [18] Мик Дж., Крэг Дж. Электрический пробой в газах. М.: ИЛ, 1960.
- [19] Экспресс-информация ВИНТИ. Сер. Водный транспорт. 1971. № 1. Реф. 4. 1974. № 23. Реф. 125. 1976. № 29. Реф. 238.
-