

# Высокоэнергетические автономные плазмоиды

Г.И. Рудоминский

E-mail: stremline@yandex.ru

*Представлена гипотеза существования электродинамических систем с высокой плотностью энергии, объясняющая природный феномен шаровой молнии. Приведены результаты расчета трех вариантов равновесного состояния модели высокоэнергетического автономного плазоида. Дано описание условий возникновения и основных свойств. Кратко рассмотрены другие виды шаровой молнии.*

**Ключевые слова:** плазмоиды, шаровая молния, неидеальная нелинейная плазма.

## Содержание

<b>1. Введение</b>	1
<b>2. Теорема вириала и шаровая молния</b>	2
<b>3. Описание модели</b>	5
<b>4. Условия возникновения</b>	15
<b>5. Основные свойства</b>	17
<b>6. Другие виды шаровой молнии</b>	18
<b>Список литературы</b>	20

## 1. Введение

К началу XXI века количество описаний редкого природного (и не только) явления атмосферного электричества, известного под термином шаровая молния (ШМ), превысило ~10000. При этом сложилась парадоксальная ситуация - чем больше фактов, тем сложнее их объяснить и связать в рамках одной физической модели. Причина этого кроется в чрезвычайно широком диапазоне параметров этого феномена, множестве свойств, порой несовместимых друг с другом. Попытки создать некий среднестатистический портрет ШМ не способствуют выяснению природы явления, так как при этом отбрасываются, или усредняются наиболее редкие и значительные характеристики феномена. Результаты экспериментов также не придают оптимизма. Все что удалось воспроизвести, относится к так называемым эрозийным плазоидам, которые тоже являются одним из возможных видов ШМ, но не обладают тем набором свойств, так привлекающих внимание исследователей этого явления.

Все основные идеи, гипотезы и теории, пытавшиеся объяснить природу феномена ШМ, были выдвинуты еще к середине XX века. Создаваемые вновь гипотезы и теории являются или вариациями этих идей, или основаны на порой фантастических предположениях о неизвестных частицах, взаимодействиях, антивеществе, черных дырах, и других «темных материях». Для создания адекватной физической модели явления,

допускающей экспериментальную проверку, необходимо ясное представление об источниках энергии, условиях возникновения, физически и математически корректное объяснение основных свойств. Ключевыми вопросами при рассмотрении природы ШМ являются: величина энергии, ее плотность и к какому виду ее можно отнести. Анализ наблюдений показывает беспрецедентный диапазон выделяемой энергии - от единиц до величины в  $10^{10}$  Дж, и максимальное значение объемной плотности энергии порядка  $10^{12}$  Дж/м<sup>3</sup>. Чем ниже оценка величины энергии ШМ и ее плотности, тем большее количество гипотез можно привлечь для объяснения природы явления. Верхние значения этих величин являются «моментом истины» для большинства гипотез. Если учесть определенную связь явления ШМ с грозовой активностью и линейной молнией, а также тем, что первичный источник энергии сосредоточен в электрическом поле грозового облака, то естественно предположить, что и ШМ содержит энергию в виде электромагнитного поля. Не исключаются и другие первичные источники энергии, такие как вулканическая активность и электрические заряды, возникающие при деформации горных пород, а также техногенные источники. Прямым свидетельством электромагнитной природы высокоэнергетических ШМ служит появление при их взрыве мощного электромагнитного импульса (ЭМИ). ЭМИ наводит токи в замкнутых металлических контурах и испаряет проводники (провода) в радиусе десятков метров от места взрыва без непосредственного контакта с ними.

## 2. Теорема вириала и шаровая молния\*

Одной из причин, сдерживающих развитие электродинамических теорий ШМ, является ограничение, накладываемое теоремой вириала на величину полной энергии плазмоида. Согласно этой теореме, полная энергия плазмоида, равная сумме кинетической энергии частиц и электромагнитного поля, не может превышать величины  $3pV$ , где  $p$  - внешнее давление окружающего газа;  $V$  – объем, занятый плазмой.

Теорема вириала, сформулированная Клаузиусом в 1870 году, определяет условия финитности движения системы, связанной потенциальными силами и ограниченной в пространстве. Эта теорема основана на общих принципах механики. Для частиц, взаимодействующих по закону Кулона, должно выполняться равенство

$$2\bar{T} = -\bar{U}, \quad (2.1)$$

где  $\bar{T}$  – средняя по времени кинетическая энергия частиц;  $\bar{U}$  – средняя по времени потенциальная энергия.

Впервые теорема вириала была использована в магнитной гидродинамике Чандрасекаром и Ферми в 1953 году. Для ограниченного объема плазмы, изолированного от внешних полей,

---

\*Примечание. В этой главе приведены оригинальные формулы в гауссовой системе.

условие равновесия выражается формулой:

$$\int \left( \rho v^2 + 3p + \frac{E^2 + H^2}{8\pi} \right) dV = 0, \quad (2.2)$$

где  $\rho$  – массовая плотность;  $v$  – скорость элемента объема;  $p$  – газокинетическое давление;  $E$  и  $H$  – электрическое и магнитное поля.

Релятивистское обобщение теоремы вириала для системы заряженных частиц, полученное с помощью аппарата тензорного исчисления в [1], имеет вид:

$$W = \sum_a m_a c^2 \sqrt{1 - \frac{v_a^2}{c^2}}, \quad (2.3)$$

где  $m_a$ ,  $v_a$  – масса и скорость частицы;  $c$  – скорость света;  $W$  – энергия системы равная

$$W = \int \frac{\overline{E^2 + H^2}}{8\pi} dV + \sum_a \frac{\overline{m_a c^2}}{\sqrt{1 - \frac{v_a^2}{c^2}}}. \quad (2.4)$$

Таким образом, (2.3) эквивалентно 
$$\int \frac{\overline{E^2 + H^2}}{8\pi} dV + \sum_a \frac{\overline{m_a v_a^2}}{\sqrt{1 - \frac{v_a^2}{c^2}}} = 0. \quad (2.5)$$

Так как слагаемые в левой части равенств (2.2) и (2.5) положительны, то эти условия равновесия невыполнимы. В результате, был сделан вывод о невозможности существования изолированной равновесной конфигурации плазмы, вошедший в учебники по физике плазмы и продолжающий гулять по просторам интернета – например в Википедии. Ошибочность такой формулировки теоремы вириала очевидна, так как она не согласуется с формой (2.1) и не допускает существование атомов и твердых тел как систем заряженных частиц. Но потребовались десятилетия, чтобы в заметке [2] была указана причина этого несоответствия, которая заключается в том, что в условиях (2.2) и (2.5) неявно сохранена сила самодействия заряженных частиц. В формулировке (2.1) присутствует только потенциальная энергия взаимодействия, принимающая и отрицательные значения, тогда как в выражения (2.2) и (2.5) входит полная энергия электромагнитного поля, которая всегда положительна. Для получения правильного результата, в [2] предложено вместо формулы (2.4) ввести перенормированную полную энергию

$$W' = \int \frac{\overline{E^2 + H^2}}{8\pi} dV - \int \frac{\overline{E_a^2 + H_a^2}}{8\pi} + \sum_a \frac{\overline{m_a c^2}}{\sqrt{1 - \frac{v_a^2}{c^2}}}.$$

При этом вместо (2.5) получается теорема вириала в виде

$$\int \frac{\overline{E^2 + H^2}}{8\pi} dV - \int \frac{\overline{E_a^2 + H_a^2}}{8\pi} + \sum_a \frac{\overline{m_a v_a^2}}{\sqrt{1 - \frac{v_a^2}{c^2}}} = 0$$

Такие ошибки типичны для так называемой «математической физики», когда за математическими формулами и преобразованиями теряется физический смысл.

Другой подход для вывода энергии системы заряженных частиц использован в работе [3]. Основываясь на Дарвинской формулировке функции Лагранжа

$$L = \frac{1}{2} \sum_i \left( m_i v_i^2 + \frac{q_i}{c} \mathbf{v}_i \mathbf{A}(\mathbf{r}_i) - q_i \varphi(\mathbf{r}_i) \right),$$

полученной при условии, что радиацией можно пренебречь, полная энергия системы заряженных частиц в нерелятивистском пределе выведена в виде

$$W = \frac{1}{2} \sum_i \left( \frac{\mathbf{p}_i^2}{m_i} - \frac{q_i}{m_i c} \mathbf{p}_i \mathbf{A}(\mathbf{r}_i) + q_i \varphi(\mathbf{r}_i) \right),$$

где  $\mathbf{p}_i = m_i \mathbf{v}_i + \frac{q_i}{c} \mathbf{A}(\mathbf{r}_i)$  – обобщенный импульс.

Из этого выражения следует, что сумма энергий электрического и магнитного взаимодействий может иметь отрицательное значение (применительно к неидеальной плотной плазме с макроскопическими токами и зарядами).

Для примера, можно подсчитать энергию магнитного взаимодействия токового кольца – потенциальной или силовой функции по терминологии, принятой в [4]

$$U = -\frac{1}{c} \int \mathbf{A} \mathbf{j} dV ,$$

и убедиться, что ее величина всегда отрицательна. Однако наличие отрицательного значения энергии взаимодействия не означает равновесия всей системы. Кольцо с током будет сжиматься по малому радиусу, и расширяться по большому. Для компенсации расширения можно добавить полоидальный ток, но и в таком случае равновесия не будет. Это является следствием различной зависимости силовых функций магнитного поля тороидального и полоидального токов от расстояния до оси симметрии. Равновесие возможно только при наличии дополнительного внешнего магнитного поля, создающего конфигурацию типа вихря Хилла. Отсюда следует вывод: в рамках линейной электродинамики невозможно равновесие изолированной токовой системы и создание «бессиловых» магнитных конфигураций.

Решение проблемы лежит в нелинейных свойствах среды - плотной неидеальной плазмы.

### 3. Описание модели

В электродинамической модели ШМ, состоящей из замкнутой системы токов в ограниченном объеме, выбор осесимметричной тороидальной топологии практически безальтернативен. Подтверждение этому можно найти при рассмотрении некоторых наблюдений природного феномена. На рис.1 из сборника [5] показана зарисовка ШМ, наблюдавшейся с расстояния около полуметра и сделанная очевидцем, художником. Известно, что художник нередко передает подробности более точно, чем фотография. ШМ имела диаметр примерно 5 см, от ШМ не было ощущения теплового воздействия, а при исчезновении ШМ была выделена энергия не менее  $3,4 \cdot 10^6$  Дж.

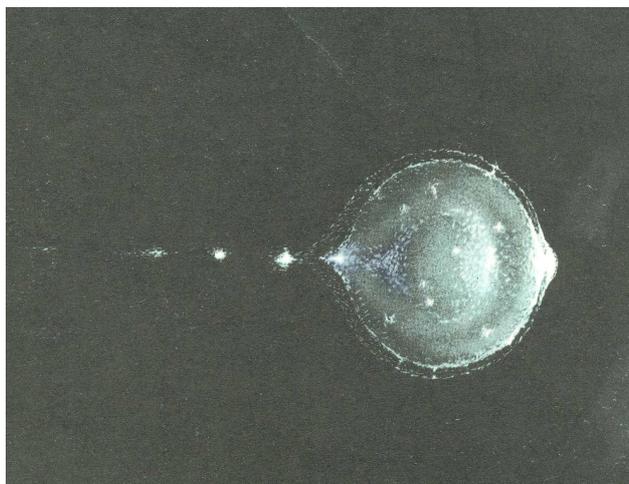


Рис.1.

На рисунке просматривается ядро объекта, несколько светящихся оболочек с осесимметричной структурой и характерными выступами на магнитных полюсах. Там, где магнитные силовые линии уходят в бесконечность, происходит потеря части вещества молнии в виде хвоста из отдельных искр, в направлении противоположном движению ШМ.

В предлагаемой модели ШМ описывается как высокоэнергетический автономный плазмод (ВАП), энергия которого сосредоточена, в основном, в магнитном поле полоидального и тороидального токов. Кроме магнитного поля в ВАП присутствует сильное электрическое поле, связанное с неоднородным распределением зарядов. При этом предполагается, что электрические и магнитные поля взаимно перпендикулярны. Для энергии ВАП диапазона ( $10^6 \div 10^{10}$ ) Дж, величина индукции магнитного поля будет составлять ( $10^3 \div 10^4$ ) Тл, при токах ( $10^7 \div 10^9$ ) А. Температура плазмы ВАП по разным оценкам, выведенным из наблюдений природного феномена, не превышает нескольких тысяч градусов. Длительный срок существования ВАП – до нескольких минут и низкая мощность потерь, оцениваемая наблюдателями в ( $10^2 \div 10^3$ ) Вт, свидетельствуют о высокой степени ионизации близкой к 100% и высокой проводимости плазмы. Плотность плазмы

ВАП может превышать плотность атмосферного воздуха, так как часто наблюдают этот объект, падающий из облаков. В модели ВАП плазма состоит из электронов и однократно ионизованных атомов азота (как основного компонента воздуха). Соотношение масс ионов и электронов равно 25716/1, поэтому вклад ионов в плотность плазмы преобладающий.

Эффекты межчастичного взаимодействия, такие как неидеальность, определяют экзотические свойства плазмы ВАП. Область существования однократно ионизованной неидеальной плазмы в [6] определяется критерием идеальности

$$\gamma = \frac{e^2 \beta}{4\pi\epsilon_0 r_s} \sim \frac{e^2 \beta n_e^{1/3}}{4\pi\epsilon_0} \ll 1,$$

где  $n_e$  - концентрация электронов;  $\beta=1/kT$ ,  $k$  - постоянная Больцмана. Величина  $\gamma$  представляет собой отношение характерной энергии кулоновского взаимодействия, на среднем межчастичном расстоянии  $r_s$ , к средней тепловой энергии  $kT$ . Значение  $\gamma > 1$  соответствует случаю неидеальной плазмы ВАП. Потенциальная энергия взаимодействия не равна нулю благодаря корреляции в положении зарядов. Поэтому среднюю потенциальную энергию межчастичного взаимодействия называют корреляционной энергией. Корреляционная энергия отрицательна и может в значительной степени компенсировать газокинетическое давление плазмы. В плотной плазме сильное межчастичное взаимодействие вызывает сдвиг и расщепление энергетических уровней, чем обусловлено снижение потенциала ионизации. Уравнение Саха не описывает реальное ионизационное равновесие в неидеальной плазме. При определении критерия идеальности в [6] принимается только электростатическое кулоновское взаимодействие. В ВАП основная энергия взаимодействия – магнитная. Сильное магнитное поле ориентирует спины валентных электронов в одном направлении, разрушая тем самым обменное взаимодействие в двухатомных молекулах  $O_2$  и  $N_2$ , что приводит к их диссоциации. Еще одним фактором, способствующим высокой степени ионизации ядра ВАП, является сильное электрическое поле напряженностью ( $10^7 \div 10^9$ ) В/м.

Можно констатировать, что в настоящее время не существует адекватного описания состояния плазмы с параметрами приписываемыми ВАП. Это состояние следует определить как упорядоченный поток частиц, вращающийся в скрещенных электрическом и магнитном полях. Ионы и электроны имеют несколько отличающиеся величины и направления скорости, что создает электрический ток, поддерживаемый с помощью ЭДС самоиндукции. Сопротивление току зависит от сечения кулоновского рассеяния электрона на ионе  $\sigma_c$ ,

обратно пропорционального квадрату энергии  $\sigma_c \sim \frac{1}{E^2}$ .

Эта энергия определяется взаимной скоростью ионов и электронов, которая составляет в ВАП (1÷10)% от полной скорости частиц. Согласно теореме вириала, потенциальная энергия взаимодействия плазмы с коллективным полем, в условиях равновесия, в два раза превышает величину кинетической энергии. Кинетическая энергия плазмы зависит, в основном, от массы и скорости ионов. Так как ионы и электроны имеют заряд одинаковой величины и близкие значения полной скорости, то энергии их взаимодействия с коллективным полем, в соответствии с выражением  $U = q\varphi - q\mathbf{v} \cdot \mathbf{A}$ , ~ равны по величине. Учитывая соотношение масс ионов и электронов, а также долю их взаимной скорости от ее полной величины, отношение энергии взаимодействия электронов с коллективным полем к кинетической энергии столкновения электрона с ионом составит  $\frac{2m_i V_i^2}{m_e V_{ei}^2} \approx (5 - 500) \cdot 10^6$ ,

где  $m_i$  и  $m_e$  - масса ионов и электронов;  $V_i$  – скорость ионов;  $V_{ei}$  – взаимная скорость.

В системе, охваченной дальнедействующим коллективным взаимодействием, именно его энергия должна определять сечение рассеяния электронов на ионах. Указанное выше обстоятельство, возможно, объясняет низкие потери от колоссальных токов, текущих в ВАП.

Для расчета равновесного состояния ВАП используется цилиндрическая система координат  $(r, \varphi, z)$ . Осевая (тороидальная) симметрия позволяет рассматривать задачу равновесия плазмы на полоидальной плоскости  $(r, z)$ . Равновесие подразумевает, что все производные по времени  $\partial / \partial t = 0$ . Это является идеализацией модели, так как наличие диссипативных процессов приводит к уменьшению со временем энергии магнитного поля ВАП и возникновению ЭДС самоиндукции. Учитывая низкую величину потерь энергии по сравнению с полной энергией ВАП, эффектами  $\partial / \partial t$  можно пренебречь при рассмотрении баланса сил. Уравнение баланса сил для равновесного состояния, в приближении идеальной одножидкостной магнитной гидродинамики, имеет вид

$$\tau(\mathbf{V} \cdot \nabla)\mathbf{V} = -\nabla p + \rho \mathbf{E} + \mathbf{j} \times \mathbf{B}, \quad (3.1)$$

где  $\tau$  - плотность плазмы;  $\mathbf{V}$  – скорость плазмы;  $p$  – давление плазмы;  $\rho$  - плотность заряда. В условиях, существующих в ВАП, электродинамические силы на несколько порядков превосходят силы газокинетического давления, поэтому градиентом давления в уравнении (3.1) можно пренебречь. Плазма в скрещенных электрическом и магнитном полях обладает аналогом диэлектрической проницаемости. При этом диэлектрическая проницаемость плазмы в общем случае является тензорной величиной. Поперечная к магнитному полю, компонента диэлектрической проницаемости в статических полях (без учета частотной дисперсии) выражается формулой

$$\varepsilon_{\perp} = 1 + \frac{\tau}{\varepsilon_0 B^2}.$$

Плотность заряда плазмы определяется как  $\rho = \nabla \cdot \mathbf{D} = \nabla \cdot (\varepsilon_0 \varepsilon_{\perp} \mathbf{E})$ .

Вектор поляризации плазмы  $\mathbf{P} = \varepsilon_0 (\varepsilon_{\perp} - 1) \mathbf{E} = \frac{\tau}{B^2} \mathbf{E}$ . Плотность тока  $\mathbf{j} = \nabla \times \mathbf{H}$ .

Магнитное поле в плазме  $\mathbf{H} = \frac{\mathbf{B}}{\mu_0} - \mathbf{I}$ , где  $\mathbf{I}$  – вектор интенсивности намагничивания.

Интенсивность намагничивания нелинейным образом зависит от величины индукции магнитного поля. Нелинейные свойства плазмы определяют возможность равновесия всей токовой конфигурации ВАП. В общем виде  $\mathbf{I} = \mathbf{I}_0 + \mathbf{P} \times \mathbf{V}$ , где  $\mathbf{V}$  скорость плазмы;

$\mathbf{I}_0 = -\frac{n_i m_i V_{i\perp}^2}{2B^2} \mathbf{B}$  – интенсивность намагничивания, образованная циклотронным вращением ионов с концентрацией  $n_i$ , массой  $m_i$  и скоростью  $V_i$ . Энергия циклотронного вращения ионов быстро теряется за счет излучения и столкновений, поэтому для установившегося равновесия интенсивность намагничивания принимает вид  $\mathbf{I} = \mathbf{P} \times \mathbf{V}$ .

Кроме сил, представленных в уравнении баланса (3.1), в плазме действуют силы пропорциональные градиентам полей. В неоднородном электрическом поле объемная плотность сил имеет общее выражение

$$\mathbf{f}_e = \nabla(\mathbf{P} \cdot \mathbf{E}) = \nabla \left( \frac{\tau E^2}{B^2} \right). \quad (3.2)$$

Объемная плотность сил в неоднородном магнитном поле

$$\mathbf{f}_m = \nabla(\mathbf{I} \cdot \mathbf{B}) = \nabla((\mathbf{P} \times \mathbf{V}) \cdot \mathbf{B}) = \nabla \left( \frac{\tau}{B^2} \left( \mathbf{E} \times \left( \frac{\mathbf{E} \times \mathbf{B}}{B^2} \right) \right) \cdot \mathbf{B} \right) = -\nabla \left( \frac{\tau E^2}{B^2} \right). \quad (3.3)$$

Из сравнения выражений (3.2) и (3.3) следует, что силы, пропорциональные градиентам полей  $\mathbf{f}_e$  и  $\mathbf{f}_m$ , полностью скомпенсированы и  $\mathbf{f}_e = -\mathbf{f}_m$ .

Для движения плазмы в скрещенных электрическом и магнитном полях должно выполняться уравнение неразрывности  $\nabla \cdot (\tau \mathbf{V}) = 0$ , где  $\mathbf{V} = \frac{\mathbf{E} \times \mathbf{B}}{B^2}$ .

$$\text{Отсюда имеем } \nabla \cdot \mathbf{V} = \nabla \cdot \left( \frac{\mathbf{E} \times \mathbf{B}}{B^2} \right) = \frac{1}{B^2} \nabla \cdot (\mathbf{E} \times \mathbf{B}) + (\mathbf{E} \times \mathbf{B}) \cdot \nabla \left( \frac{1}{B^2} \right). \quad (3.4)$$

В случае квазистатических полей  $\nabla \times \mathbf{E} \approx \mathbf{0}$  и  $\nabla \times \mathbf{B} \neq \mathbf{0}$ , поэтому

$$\nabla \cdot (\mathbf{E} \times \mathbf{B}) = \mathbf{B} \cdot (\nabla \times \mathbf{E}) - \mathbf{E} \cdot (\nabla \times \mathbf{B}) = -\mathbf{E} \cdot (\nabla \times \mathbf{B}).$$

Подставляя последнее выражение в (3.4), получаем

$$\nabla \cdot \left( \frac{\mathbf{E} \times \mathbf{B}}{B^2} \right) = -\frac{\mathbf{E} \cdot (\nabla \times \mathbf{B})}{B^2} + (\mathbf{E} \times \mathbf{B}) \cdot \nabla \left( \frac{1}{B^2} \right) = -\frac{\mathbf{E} \cdot (\nabla \times \mathbf{B})}{B^2} - \frac{(\mathbf{E} \times \mathbf{B}) \cdot \nabla B^2}{B^4} = -\frac{\mathbf{E} \cdot (\nabla \times \mathbf{B})}{B^2} - \frac{\mathbf{V} \cdot \nabla B^2}{B^2}.$$

Уравнение неразрывности преобразуется к виду:

$$\nabla \cdot (\tau \mathbf{V}) = (\nabla \tau) \cdot \mathbf{V} - \frac{\tau}{B^2} (\mathbf{E} \cdot (\nabla \times \mathbf{B}) + \mathbf{V} \cdot (\nabla B^2)) = 0,$$

$$(\nabla \tau) \cdot \mathbf{V} = \frac{\tau}{B^2} (\mathbf{E} \cdot (\nabla \times \mathbf{B}) + \mathbf{V} \cdot (\nabla B^2)), \quad \nabla \tau = \tau \left( \frac{\mathbf{E} \cdot (\nabla \times \mathbf{B})}{(\mathbf{E} \times \mathbf{B})} + \frac{\nabla B^2}{B^2} \right).$$

При условии отсутствия токов, перпендикулярных поверхностям уровня,  $\mathbf{E} \cdot (\nabla \times \mathbf{B}) \approx 0$ .

В результате, получаем уравнение для расчета плотности плазмы при заданных граничных условиях:

$$\nabla \tau = \frac{\tau}{B^2} \nabla B^2. \quad (3.5)$$

Уравнение (3.5) следует считать приближенным, так как в нем не учитывается скольжение плазмы вдоль силовых линий магнитного поля. Поэтому, при вычислении полоидальной скорости ионов дополнительно используется условие

$$\nabla \cdot (\tau \mathbf{V}_{i_p}) = 0, \quad (3.6)$$

где  $\mathbf{V}_{i_p}$  – полоидальная скорость ионов.

Из-за наличия диссипативных потерь, ВАП не является строго консервативной системой, но учитывая низкий уровень потерь по сравнению с полной энергией, к ней можно применить гамильтонов формализм. Если электромагнитное поле осесимметрично, то должен сохраняться момент импульса для ионов

$$p_\varphi = r(m_i V_{i_\varphi} + q A_\varphi) = const,$$

где  $m_i$  – масса иона;  $V_{i_\varphi}$  - азимутальная скорость иона;  $q$  - элементарный заряд;

$A_\varphi$ - азимутальная компонента векторного потенциала.

Закон сохранения энергии

$$W = \frac{m_i V_i^2}{2} + qU = const, \text{ здесь } U \text{ – потенциал электрического поля.}$$

Поверхности равного потенциала, магнитные и токовые поверхности в общем случае не совпадают. Из-за большой разницы в массах ионов и электронов, токовые поверхности ионов смещаются относительно магнитных поверхностей на величину порядка циклотронного радиуса ионов. Электрические и магнитные поля ВАП являются самосогласованными и определяются координатами и скоростью всех частиц. Смещение положительных ионов относительно электронов приводит к смещению поверхности уровня потенциала на величину равную примерно половине циклотронного радиуса ионов. Это обстоятельство сильно усложняет проведение расчетов равновесия всей системы. Так как относительное смещение уровней невелико и мало сказывается на балансе электродинамических сил, то в качестве первого приближения в модели считается, что все три поверхности совпадают. Смещение уровней оказывает основное влияние на значение полоидальной скорости ионов, которое можно вычислить из уравнения неразрывности (3.6). Вычисление баланса сил для электронов при большом соотношении масс ионов и электронов приводит к очень малому шагу дискретизации, что технически невыполнимо. Средняя

скорость электронов, без учета скорости циклотронного вращения, определяется из уравнения для плотности тока

$$\mathbf{j} = q(n_i \mathbf{V}_i - n_e \mathbf{V}_e),$$

где  $n_i$  и  $n_e$  – концентрация ионов и электронов соответственно;  $\mathbf{V}_i$  и  $\mathbf{V}_e$  – скорость ионов и электронов.

На границе ядра ВАП и окружающего атмосферного воздуха происходит интенсивное торможение ионов при их столкновении с нейтральными частицами. Электроны тормозятся медленнее, поэтому начинают опережать ионы, создавая обратный ток.

Электроны концентрируются в пограничном слое, снижая потенциал ядра ВАП до нуля.

Толщина пограничного слоя имеет величину порядка циклотронного радиуса ионов.

Считая слой тонким, и принимая условие  $\text{Rot } \mathbf{B} = 0$ , плотность поверхностного тока определяется из выражения:

$$\mathbf{j}_s = \mathbf{n} \times (\mathbf{H}_1 - \mathbf{H}_2),$$

где  $\mathbf{n}$  – единичный вектор, направленный по нормали к поверхности ВАП во внешнюю зону;

$\mathbf{H}_1$  - значение напряженности магнитного поля на внешней стороне пограничного слоя;

$\mathbf{H}_2$  - значение напряженности магнитного поля на внутренней стороне пограничного слоя.

Учитывая, что  $\mathbf{H}_1 = \frac{\mathbf{B}}{\mu_0}$  и  $\mathbf{H}_2 = \frac{\mathbf{B}}{\mu_0} - \mathbf{I}_2 = \frac{\mathbf{B}}{\mu_0} - \frac{\tau}{B^4} (\mathbf{E}_2 \times (\mathbf{E}_2 \times \mathbf{B})) = \frac{\mathbf{B}}{\mu_0} + \frac{\tau E_2^2}{B^4} \mathbf{B}$ ,

плотность поверхностного тока будет равна  $\mathbf{j}_s = -\frac{\tau E_2^2}{B^4} (\mathbf{n} \times \mathbf{B})$ . Здесь и далее индексы 1, 2

соответствуют значениям параметров на внешней и внутренней стороне пограничного слоя.

Плотность сил, действующих на поверхностный ток в магнитном поле

$$\mathbf{f}_m = \frac{1}{2} (\mathbf{j}_s \times \mathbf{B}) = \frac{\tau E_2^2}{2B^2} \cdot \mathbf{n}.$$

Поверхностная плотность заряда пограничного слоя

$$\rho_s = \text{Div } \mathbf{D} = \mathbf{n} \cdot (\mathbf{D}_1 - \mathbf{D}_2) = -\frac{\tau}{B^2} (\mathbf{n} \cdot \mathbf{E}_2).$$

Плотность силы, действующей на поверхностный заряд в электрическом поле

$$\mathbf{f}_e = \frac{1}{2} \rho_s \mathbf{E}_2 = -\frac{\tau E_2^2}{2B^2} \cdot \mathbf{n}.$$

Сумма сил действующих на пограничный слой  $\mathbf{f}_e + \mathbf{f}_m = 0$ . (3.7)

К аналогичному результату приводит сравнение плотности сил натяжения электрического поля, приложенных к пограничному слою  $\mathbf{f}_e = -\mathbf{n} \cdot \left( \frac{\mathbf{E}_1 \mathbf{D}_1}{2} - \frac{\mathbf{E}_2 \mathbf{D}_2}{2} \right)$ , и плотности сил давления магнитного поля  $\mathbf{f}_m = \mathbf{n} \cdot \left( \frac{\mathbf{H}_1 \mathbf{B}_1}{2} - \frac{\mathbf{H}_2 \mathbf{B}_2}{2} \right)$ .

Ввиду значительного преобладания электродинамических сил, в приближенном уравнении равновесия пограничного слоя (3.7) не учитываются градиент давления на границе и нормальная проекция силы трения  $R_n$  плазмы с окружающей атмосферой.

Равновесное состояние сложной динамической нелинейной системы ВАП определяется ее предысторией. Поэтому точный расчет равновесия возможен только при решении полной динамической задачи. При отсутствии проверенных данных о поведении плазмы в экстремальных силовых полях и использовании для расчета только первых принципов, решение полной динамической задачи (например, методом крупных частиц) выходит за грани возможностей современной вычислительной техники. Приближенный расчет возможен при некоторых упрощающих предположениях и априорном задании основных параметров.

Далее, представлены результаты расчета трех вариантов модели ВАП, отличающихся геометрическими размерами и с соотношением энергии  $\sim 10/1$ . Расчет проводился комбинированным методом многомерной нелинейной оптимизации и методом «водяного мешка». При этом решение сходится к некоторому равновесию, точность которого определяется величиной дискретности представления модели и погрешностью методов вычисления. Следует отметить, что сходимость решения по методу «водяного мешка» свидетельствует о макроскопической устойчивости модели ВАП.

На рис. 2 и 3 показаны профили основных расчетных параметров ВАП для варианта (а) в плоскости симметрии  $z=0$ : электрического поля -  $E$ , плотности заряда -  $\rho$ , индукции магнитного поля -  $B$ , плотности токов -  $j$ , скорости ионов -  $V_i$ , плотности плазмы -  $\tau$ , концентрации ионов -  $n_i$ .

На рис. 4 показаны объемные плотности сил и их суммарная величина для варианта (а) в плоскости  $z=0$ . Профили параметров для всех трех вариантов имеют сходство по форме и отличаются амплитудными значениями.

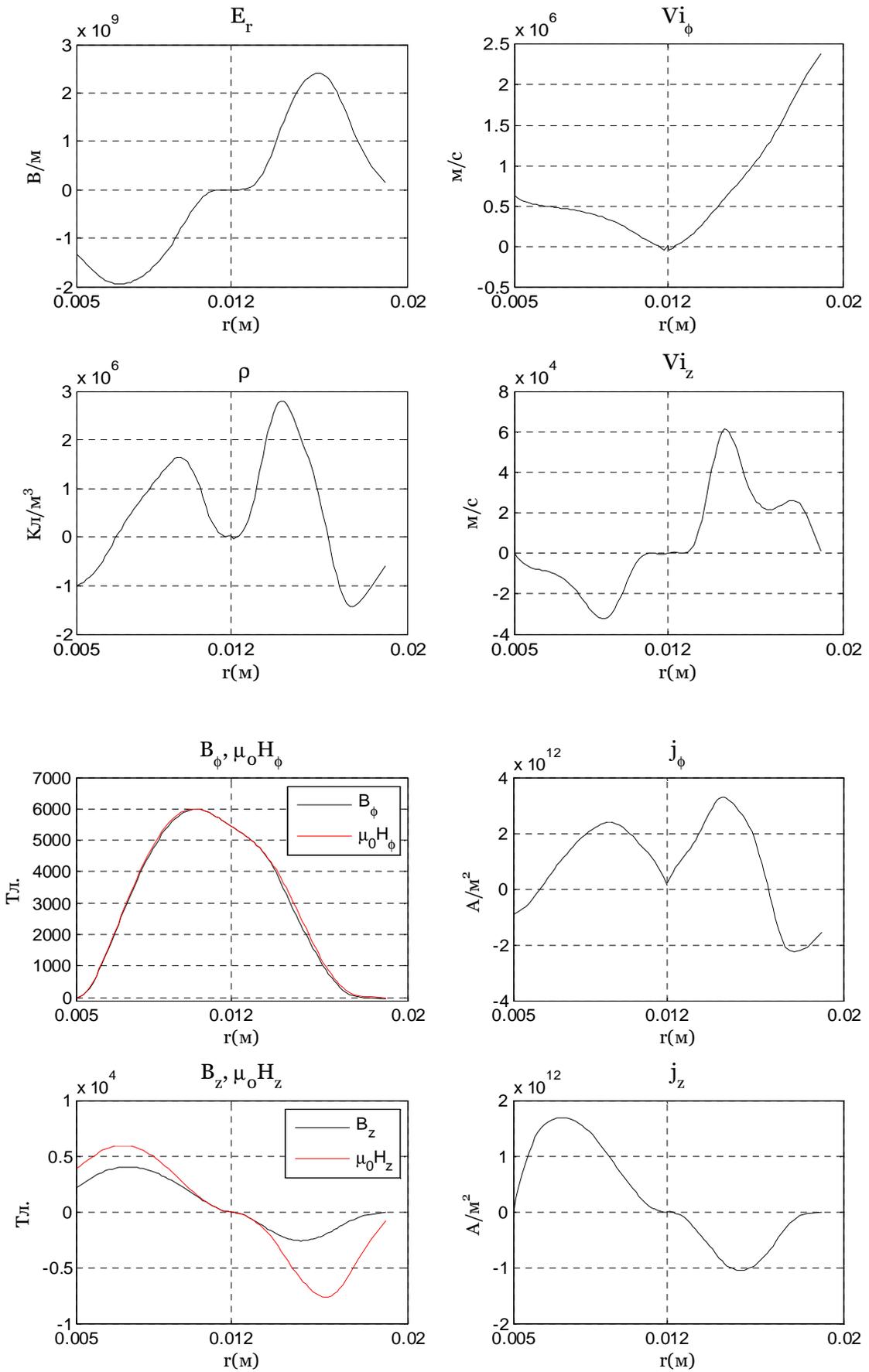


Рис.2.

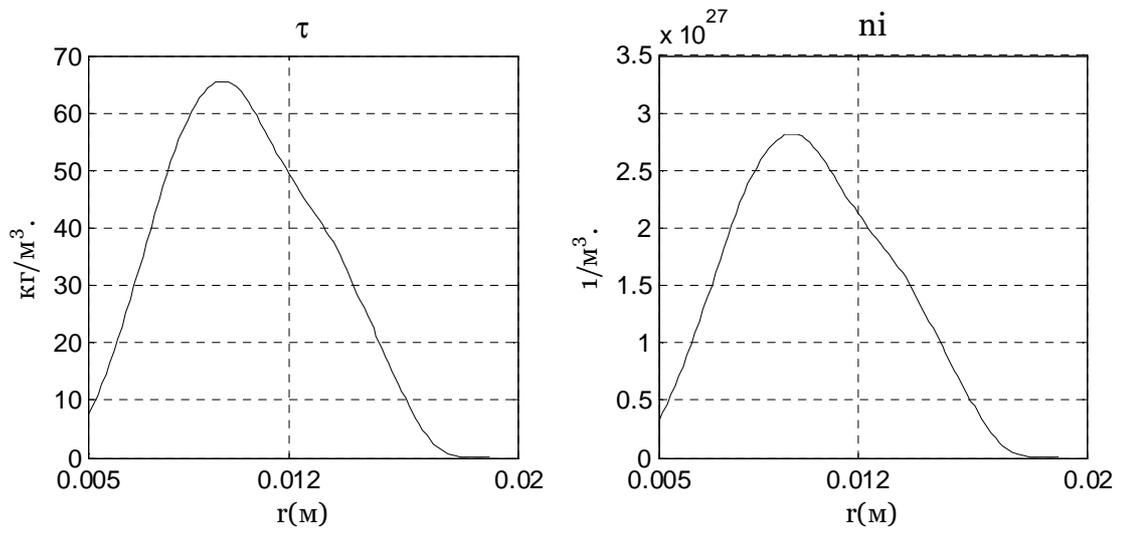


Рис.3.

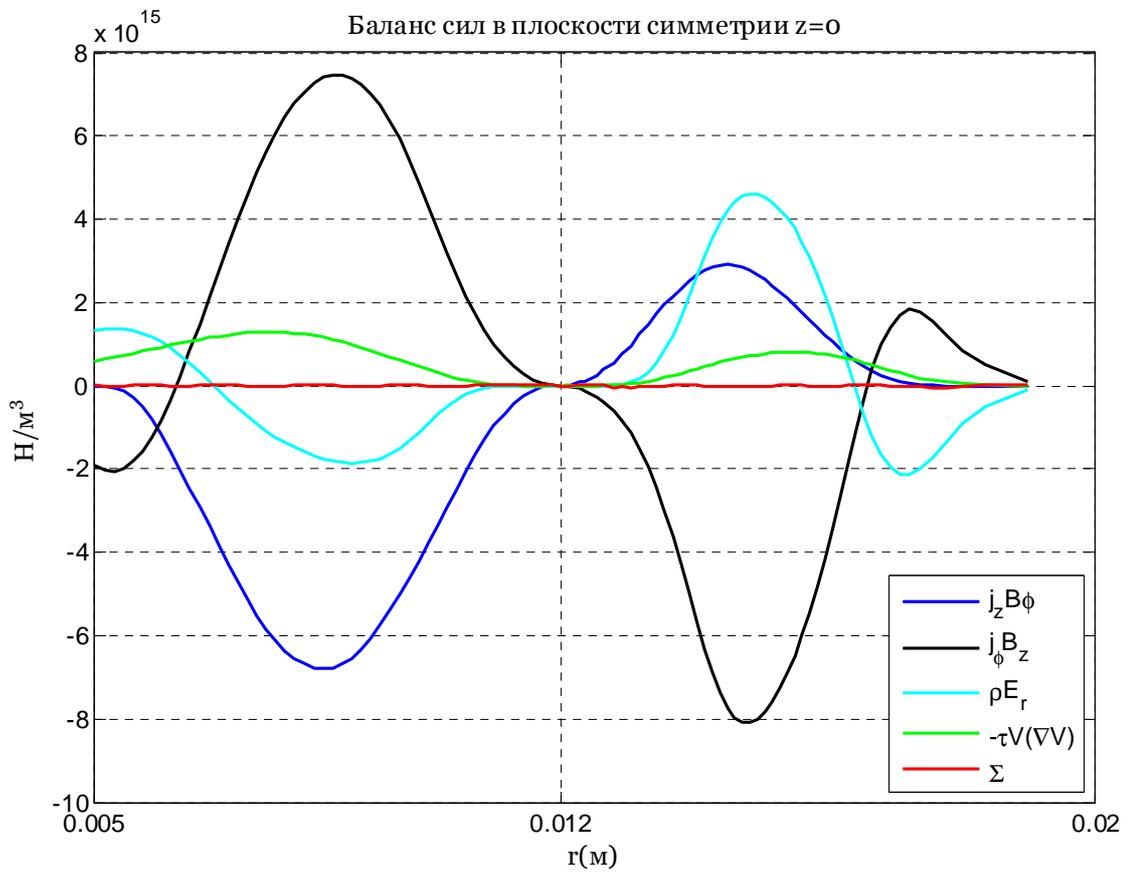


Рис.4.

В таблицу 1 сведены максимальные и средние значения некоторых расчетных параметров, а также интегральные значения основных видов энергии ВАП.

Таблица 1.

Параметры	Вариант а	Вариант б	Вариант в	Единица измерения
диаметр ядра по координате r	0,038	0,038	0,2	м
объем - V	$1,3 \cdot 10^{-5}$	$1,3 \cdot 10^{-5}$	$1,62 \cdot 10^{-3}$	м <sup>3</sup>
масса	$2,0 \cdot 10^{-4}$	$1,35 \cdot 10^{-4}$	$1,86 \cdot 10^{-2}$	кг
средняя плотность	15,5	10,4	11,5	кг/м <sup>3</sup>
максимальная плотность - $\tau$	65,57	37,5	41,4	кг/м <sup>3</sup>
максимальное значение индукции - B	6230	2120	1770	Тл
максимальное значение поля - E	$2,4 \cdot 10^9$	$3,35 \cdot 10^8$	$2,17 \cdot 10^8$	В/м
максимальная скорость ионов - u	$2,3 \cdot 10^6$	$9,66 \cdot 10^5$	$8 \cdot 10^5$	м/с
полоидальный ток	$3,22 \cdot 10^8$	$1,08 \cdot 10^8$	$4,4 \cdot 10^8$	А
тороидальный ток	$7,16 \cdot 10^7$	$2,75 \cdot 10^7$	$1,33 \cdot 10^8$	А
заряд ядра - Q	2,68	2,37	65,6	Кл
энергия электрического поля $W_1 = \frac{1}{2} \int_V \epsilon_0 E^2 dV$	126	2,6	140	Дж
энергия магнитного поля ядра $W_2 = \frac{1}{2} \int_V \frac{B^2}{\mu_0} dV$	$5,37 \cdot 10^7$	$6,45 \cdot 10^6$	$5,62 \cdot 10^8$	Дж
энергия внешнего полоидального магнитного поля $W_3 = \frac{1}{2} \int_V \frac{B^2}{\mu_0} dV$	$1,73 \cdot 10^6$	$2,56 \cdot 10^5$	$2,82 \cdot 10^7$	Дж
кинетическая энергия плазмы $w_4 = \frac{1}{2} \int_V \tau u^2 dV$	$3,15 \cdot 10^7$	$3,03 \cdot 10^6$	$2,25 \cdot 10^8$	Дж
энергия $W_5 = \frac{1}{2} \int_V (\mathbf{E} \cdot \mathbf{D}) dV$	$2,18 \cdot 10^7$	$2,47 \cdot 10^6$	$2,09 \cdot 10^8$	Дж
энергия $W_6 = \frac{1}{2} \int_V (\mathbf{B} \cdot \mathbf{H}) dV$	$7,55 \cdot 10^7$	$8,89 \cdot 10^6$	$7,67 \cdot 10^8$	Дж
суммарная энергия $W_s = W_3 + W_5 + W_6$	$9,9 \cdot 10^7$	$1,16 \cdot 10^7$	$1,0 \cdot 10^9$	Дж
средняя объемная плотность энергии $\omega = \frac{W_s}{V}$	$7,67 \cdot 10^{12}$	$8,92 \cdot 10^{11}$	$6,17 \cdot 10^{11}$	Дж/м <sup>3</sup>

Примечание. Часть кинетической энергии плазмы  $W_4$  в скрытом виде входит в энергию  $W_5$  как энергия диэлектрика (замагниченной плазмы) в электрическом поле, кроме той части, что обусловлена скоростью ионов, продольной магнитному полю.

Ядро ВАП является источником коротковолнового ультрафиолетового света, ионизирующего прилегающие слои воздуха. Так как ВАП теряет энергию магнитного поля, то во внешней зоне появляется электрическое поле  $\mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t}$ , создающее ток и свечение, охватывающее тороид, как показано на рис. 5, 6. Свечение вызывает продольная внешнему

магнитному полю компонента  $\mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t}$ . Появление электрического поля может быть вызвано и различными внутренними колебательными процессами в ВАП.

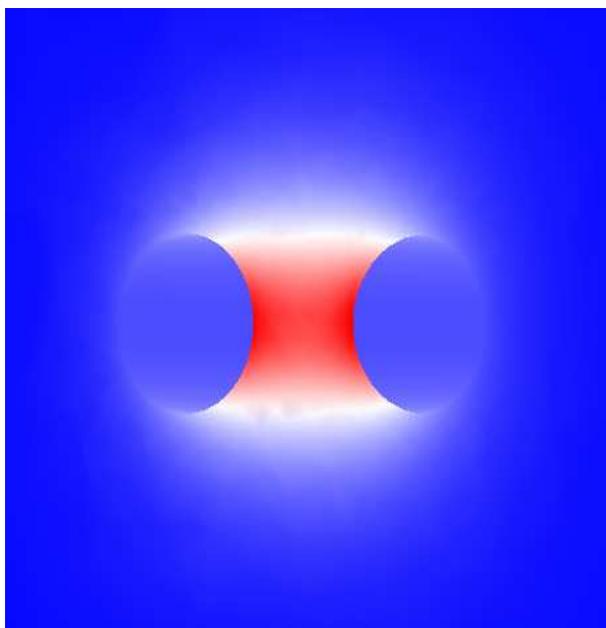


Рис.5.

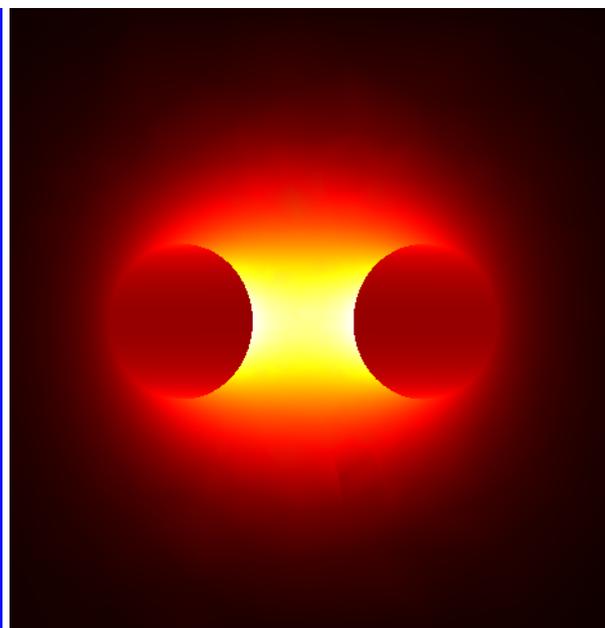


Рис.6.

#### 4. Условия возникновения

Энергия грозового облака заключена в электрическом поле грозовых ячеек, каждая из которых может содержать до нескольких ГДж энергии. Чтобы сосредоточить значительную часть этой энергии в небольшом объеме ВАП, нужен канал передачи энергии. Таким естественным каналом служит линейная молния. Часто предполагают, что ШМ образуется за счет отделения части канала линейной молнии при его резком изгибе или при образовании токовых перетяжек. Энергия одного погонного метра канала линейной молнии, которая содержится в его магнитном поле, при радиусе канала 5 см и максимальном зафиксированном токе 200 кА - порядка  $10^4$  Дж. Этой величины недостаточно для объяснения наблюдаемых максимальных значений энергии ШМ. Линейная молния в главной стадии представляет собой процесс интенсивной диссипации энергии. Температура канала достигает  $10^4$  К и более, при этом канал расширяется со сверхзвуковой скоростью и вызывает ударную волну. Все что может создать линейная молния в главной стадии разряда (при испарении какого либо материала) - это эрозийный плазмоид.

Процесс образования ВАП происходит следующим образом. Большинство линейных молний начинается с развития лидерного канала от грозовой ячейки с отрицательным зарядом. Лидерный канал выносит потенциал грозовой ячейки в разрядный промежуток. Если траектория лидерного канала проходит достаточно близко к грозовой ячейке с зарядом

противоположного знака, то от этой ячейки будет развиваться положительный лидерный канал, направленный к стволу отрицательного лидера. При их соединении получается разряд, имеющий характерный вид буквы Т. Такую форму легко получить в лабораторных условиях при разряде в трехэлектродной системе. На рис.7 показана фотография лабораторного Т-разряда при низких уровнях энергии ~10 Дж.

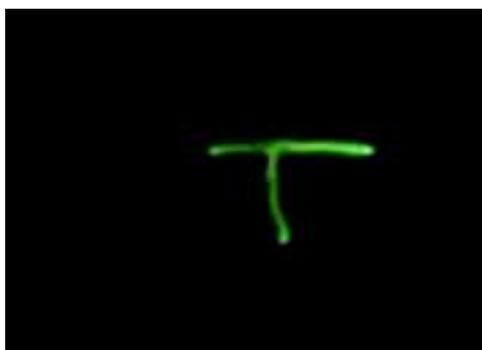


Рис.7.

Разряд линейной молнии состоит из нескольких импульсов, количество которых обычно составляет  $3 \div 5$ , но может достигать до 50. Ступенчатый лидер первого импульса движется с остановками. В момент остановки, ток лидера и его магнитное поле спадают до нуля или небольшого значения. Стреловидные лидеры последующих импульсов движутся без остановок. Стреловидные лидеры имеют диаметр несколько миллиметров и ток до 20 кА. Магнитное взаимодействие отрицательного стреловидного лидера и положительного лидера имеет определяющее значение для образования ВАП. На расстоянии порядка циклотронного радиуса электронов в магнитном поле отрицательного лидера, положительный лидер будет двигаться по кольцу вдоль силовых линий магнитного поля. Замыканию лидерных каналов в сильном электрическом поле препятствует эффект магнитной изоляции. Ток кольца, в свою очередь, создает магнитное поле, которое будет захватывать электроны отрицательного лидерного канала, образуя полоидальную оболочку ВАП. Между кольцом и оболочкой, в скрещенных электрическом и магнитном полях, начнет раскручиваться поток плазмы, формируя тороидальную структуру ядра ВАП. Таким образом, образование ВАП представляет собой зарядку магнитогидродинамического конденсатора от двух грозových ячеек с противоположными знаками заряда через каналы лидеров линейной молнии. Теоретически, процесс зарядки этого конденсатора через сопротивление каналов может сосредоточить в ВАП до 50 % энергии грозových ячеек. После окончания процесса зарядки, ВАП отделяется от «пуповин», соединявших его с материнским грозovým облаком, и продолжает самостоятельное существование. В одном разряде линейной молнии может образоваться несколько таких объектов – по числу повторных импульсов. Если эти объекты

не успеют удалиться на большое расстояние, то они могут образовать связанную магнитным полем структуру, состоящую из нескольких ячеек.

На рис.8 показана фотография линейной молнии, приведенная в [7], на которой отмечено место возможного образования ВАП.

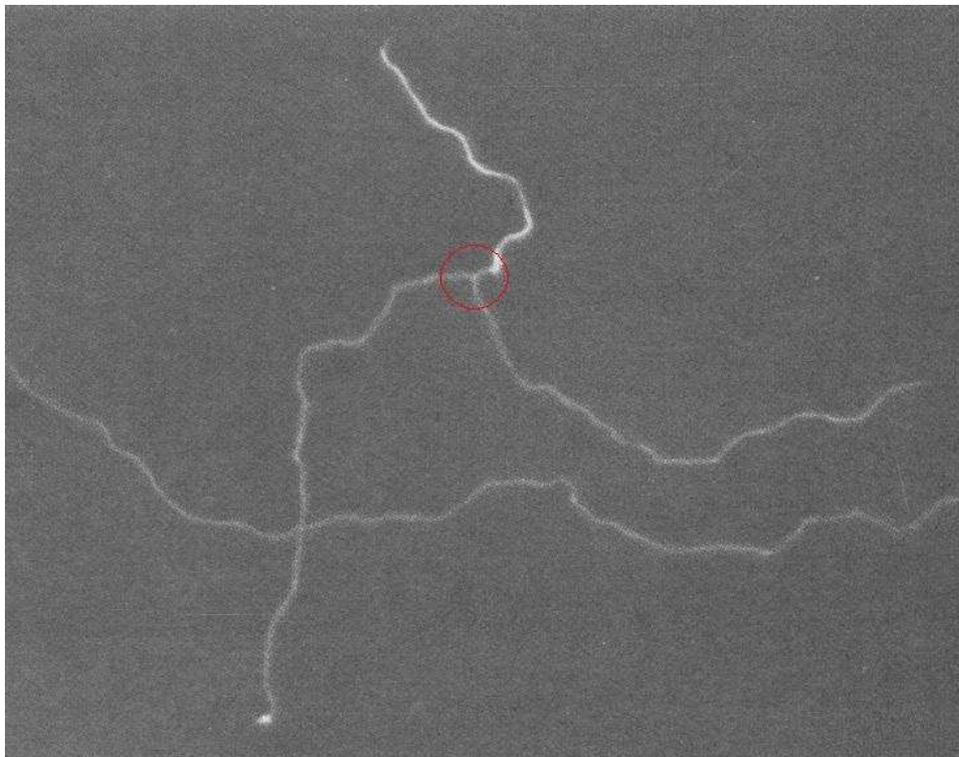


Рис.8.

## 5. Основные свойства

На поведение ВАП вблизи к поверхности земли и его взаимодействие с окружающими предметами большое влияние оказывает сильное внешнее магнитное поле. Кроме этого, как уединенный проводящий объект, ВАП может нести избыточный электрический заряд. Взаимодействие этого заряда с электрическим полем атмосферы и наведенными зарядами в близко расположенных предметах объясняет наблюдаемое парение ВАП, несмотря на более высокую среднюю плотность, чем у окружающего воздуха. Магнитное поле ВАП, имеющее градиент около полюсов  $\sim 10^4$  Тл/м, будет притягивать магнитные и парамагнитные вещества. Кислород является парамагнетиком, что должно привести к увеличению парциального давления кислорода около магнитных полюсов ВАП. При движении ВАП, его магнитное поле наводит вихревые токи в массивных металлических предметах. Диамагнетики отталкиваются от внешнего магнитного поля ВАП. Вода является диамагнетиком, поэтому капли дождя обтекают ВАП не касаясь его. Взрыв ВАП может являться следствием развития одной из плазменных неустойчивостей.

При взрыве ВАП основная часть энергии выделяется в виде электромагнитного импульса (ЭМИ). Это объясняет слабые механические эффекты взрыва при отсутствии конструкций, способных поглотить энергию ЭМИ. В противном случае происходит плавление, испарение, деформация металлических объектов и конструкций с замкнутым проводящим контуром.

Одно из наиболее странных свойств ШМ – проникновение через твердые преграды без видимого нарушения их целостности. Многократно наблюдалось прохождение через стекла. Есть наблюдения прохождения через кирпичную и бетонную стену. ШМ проникает через металлическую обшивку в герметические салоны самолетов и через металлическую переборку в салоне самолета (материал - алюминиевый сплав). Объяснение этому следует искать в еще не изученных свойствах вещества в сверхсильных магнитных полях. Энергия магнитного поля в  $(1000 \div 1500)$  Тл превышает энергию связи твердого вещества. В магнитном поле ВАП, имеющем значение  $(10^3 \div 10^4)$  Тл, может нарушаться обменное взаимодействие, удерживающее атомы в молекулах, и «замораживается» металлическая связь. Происходит как бы холодное плавление твердых структур, и в результате, ВАП проходит через преграду как вода сквозь песок. Это свойство ВАП можно назвать сверхпроницаемостью.

## 6. Другие виды ШМ

Еще одним возможным объяснением прохождения ШМ через диэлектрические преграды (стекло) является гипотеза «микроволнового пузыря» [8]. Этот вид ШМ состоит из микроволнового излучения, запертого в плазменную оболочку. Излучение ионизирует и выдавливает воздух, создавая вакуумный объем окруженный слоем плазмы, отражающей излучение. Давление микроволнового излучения должно уравнивать атмосферное давление воздуха равное  $p \approx 10^5$  Н/м<sup>2</sup>. Условие равновесия имеет вид  $\omega(1+k_r)=p$ , здесь  $\omega$  – объемная плотность энергии падающего на границу микроволнового излучения;

$k_r$  – коэффициент отражения излучения поверхностью плазменного слоя. При коэффициенте отражения  $k_r \approx 1$  плотность энергии излучения на границе, равная сумме энергий падающей и отраженной волны, составит  $\omega_g \approx 10^5$  Дж/м<sup>3</sup>. Для сферически сходящихся и расходящихся волн, плотность энергии излучения обратно пропорциональна квадрату расстояния фронта волны от центра при условии, что длина волны значительно меньше радиуса ШМ. Полная энергия ШМ составит  $W \approx 4\pi\omega_g R^3 = 3pV$ , где  $R$  – радиус ШМ;  $V$  – объем, занимаемый излучением. Так как атмосферное давление постоянно, а давление микроволнового излучения обратно пропорционально квадрату расстояния от центра ШМ, то равновесие на границе будет устойчивым к небольшим деформациям геометрии поверхности.

При прохождении такого объекта сквозь стекло с достаточно большой скоростью, видимых повреждений не наблюдается. При более медленном прохождении, стекло будет иметь

максимальный нагрев по периметру объекта, что приведет к откалыванию круглого осколка стекла. Проблема заключается в том, что микроволнового излучения необходимой мощности никогда не было зафиксировано при разряде линейных молний. Плотность энергии, достаточная для создания «микроволнового пузыря», есть только в ВАП. Микроволновое излучение с частотой в десятки ГГц и требуемой мощности способно генерироваться при раскачке плазменной неустойчивости в ВАП. Образование «микроволнового пузыря» следует рассматривать как фазовый переход ВАП в другую форму существования.

Из наблюдений известен еще один вид ШМ с характерной особенностью, которой является поверхностное натяжение ее вещества. Этот вид ШМ не обладает большой энергией и часто появляется внутри помещений или возникает из различных электроприборов. Объект может в больших пределах менять свою форму, проходить сквозь узкие щели и отверстия, восстанавливая затем первоначальную шаровую форму. Такие свойства ШМ объясняются дальнедействующими силами между веществом ее составляющим. Это могут быть электростатические или магнитные силы. Наиболее часто в гипотезах привлекаются электростатические силы между гидратированными кластерными ионами [9]. При этом считается, что гидратные оболочки ионов могут задерживать их рекомбинацию. Однако, эти гипотезы так и не нашли подтверждения. Тем более что в помещениях и электроприборах отсутствует вода, необходимая для образования гидратированных кластеров. В таких условиях наиболее вероятно образование ШМ из магнитных кластеров. Магнитный кластер состоит из замкнутой цепочки атомов (на подобии молекулы бензола) с захваченным магнитным полем и циркулирующим по кольцу током. Как вариант, внутри кольца может находиться положительно заряженный ион. Ток кольца образуется обобществленными валентными и присоединенными электронами. Суммарный заряд кластера равен нулю. При этом магнитное поле кольцевого тока препятствует рекомбинации иона. Такие кластеры могут объединяться в различные структуры с помощью магнитного поля, создающего эффект поверхностного натяжения. Наиболее вероятно, что образование магнитных кластеров происходит в основании стримеров, возникающих при грозových перенапряжениях, которые создают на концах проводников серию импульсов мегавольтного диапазона. Плазма в основании короткого (по времени) стримера остается холодной, а импульсный ток, имеющий максимальное значение в основании стримера, создает вихревое электрическое поле. Эти процессы, возможно, и создают замкнутые цепочки атомов с захваченным магнитным полем.

Не исключена и другая причина возникновения ШМ из магнитных кластеров. На финальном этапе существования ВАП, в котором присутствует холодная плотная плазма и сильное магнитное поле, может начаться процесс образования (полимеризации) магнитных

кластеров. Это еще один вариант фазового превращения ВАП в другую форму существования.

### Список литературы

1. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теория поля.- М.: Физматгиз, 1962.
2. Шафранов В.Д. О теореме вириала для системы заряженных частиц. //УФН 128, с. 161-164, (1979).
3. Essén H. *Magnetism of Matter and Phase Space Energy of Charged Particle System* Journal of Physics A: Mathematical and General **32** (1999), pp. 2297-2314.
4. Тамм И. Е. Основы теории электричества.- М.: Физматлит, 2003.
5. Сборник ЧЕЛОВЕК И СТИХИЯ. - Л.: Гидрометеоиздат, 1972.
6. Фортов В.Е., Храпак А.Г., Якубов И.Т. Физика неидеальной плазмы.-М.: Физматлит, 2004.
7. Барри Дж. Шаровая молния и четочная молния. - М.: Мир, 1983.
8. Dawson, G. A. & Jones, R. C. Ball lightning as a radiation bubble. *Pure Appl. Geophys.* **75**, 247–262 (1969).
9. Стаханов И. П. Физическая природа шаровой молнии.- М.: Атомиздат, 1979.