

# Шаровая молния

Плазменно-пучковая модель

Максим АКИМОВ

## Введение

Сегодня каждый школьник знает, что молния – это искровой газовый разряд, возникающий при обычном давлении и напряженности электрического поля порядка 3000 кВ/м. Но что же можно сказать о другой более редкой и загадочной молнии: – шаровой молнии? Если говорить откровенно, то по сути – ничего. Конечно, существуют десятки различных теорий на природу шаровой молнии, в ряде лабораторий мира были получены явления очень похожие на шаровую молнию, наблюдаемую в природе, но... Но, как говорится «а воз и ныне там». Наука пока не может дать исчерпывающих ответов, что такое шаровая молния, какова ее природа, почему и как она возникает, как распадается и т.д.

Трудность в изучении шаровой молнии состоит в том, что это очень редкое явление природы и, хотя существуют тысячи свидетельств очевидцев, собранные по всему миру, многие люди, в том числе и научной среде, не верят даже в ее существование.

В 80% всех случаев описанных наблюдений шаровой молнии в природе, происходило во время или сразу после грозы, поэтому очевидно предположение, что эти два явления – линейная и шаровая молния – тесно взаимосвязаны. Некоторые свидетели утверждают, что именно после удара обычной линейной молнии они наблюдали молнию шаровую, а значит, именно линейная молния способна порождать шаровую. На вопрос, как это может происходить, возможно, даст ответ данная статья.

Каждый из нас видел линейную молнию и тот неповторимый путь, который она на миг вычерчивает между небом и землей. Но почему молния выбирает в воздухе тот, а не иной путь, в чем причина выбора столь замысловатой траектории линейной молнии? В принципе, ответ на этот вопрос и дает ключ к пониманию возникновения шаровой молнии, поэтому остановимся на нем подробнее.

## Линейная молния и электронный пучок

Согласно последним представлениям линейная молния, это совокупность явлений, вызываемых в воздухе прохождением потока быстрых электронов (электронного пучка), движущихся в газовой среде с огромной скоростью – 100...10000 км/с по траектории наименьшего сопротивления. Электронный пучок – это по сути главный «виновник» возникновения линейной и шаровой молнии, поэтому стоит подробно рассмотреть его свойства и то, как он взаимодействует с газовой средой.

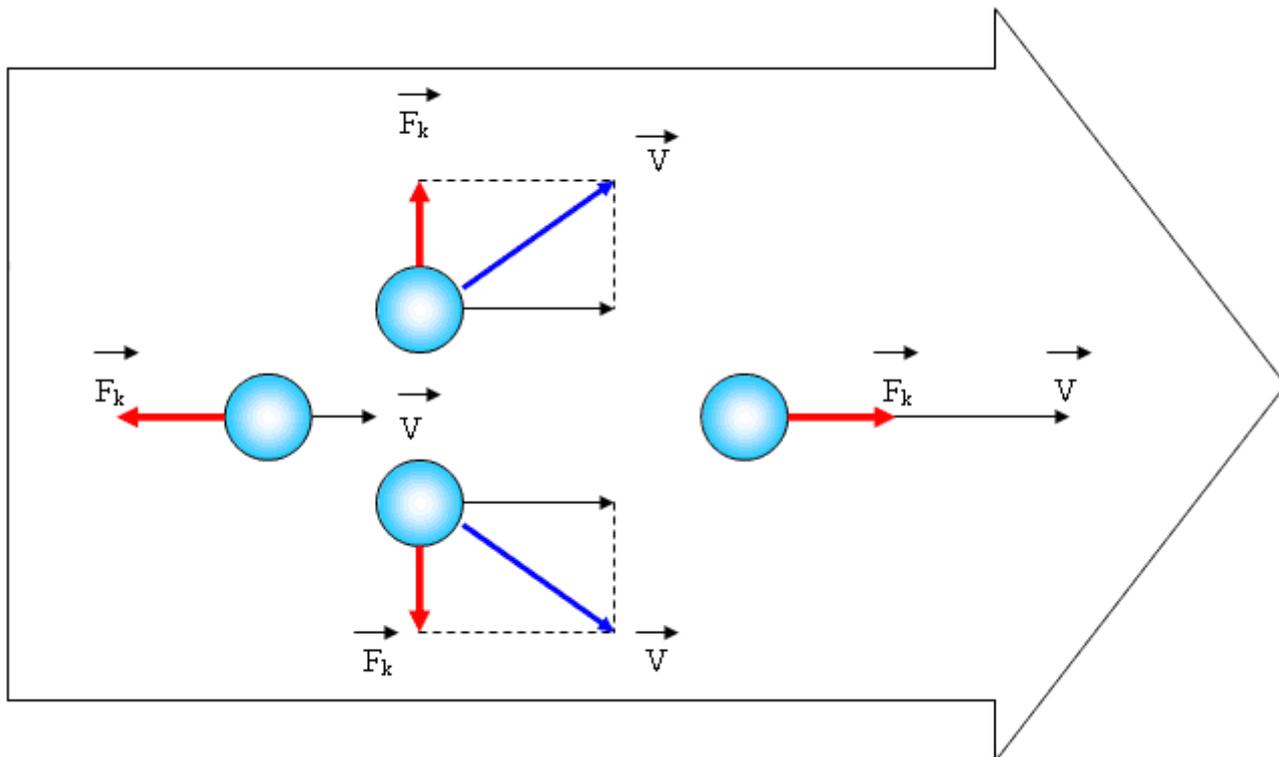
В ряде случаев описание отдельных частиц не дает представления о картине распространения пучка в целом. Например, если электронный пучок распространяется в тормозящей среде (плазме) или в случае сильноточного пучка с током более 1000 А.

Электронный пучок линейной молнии движется в среде с очень большой скоростью: в среднем более 1000 км/с. При такой скорости его распространения вдоль канала молнии его уже нельзя рассматривать как независимый набор свойств отдельных электронов, такой пучок обладает коллективными свойствами.

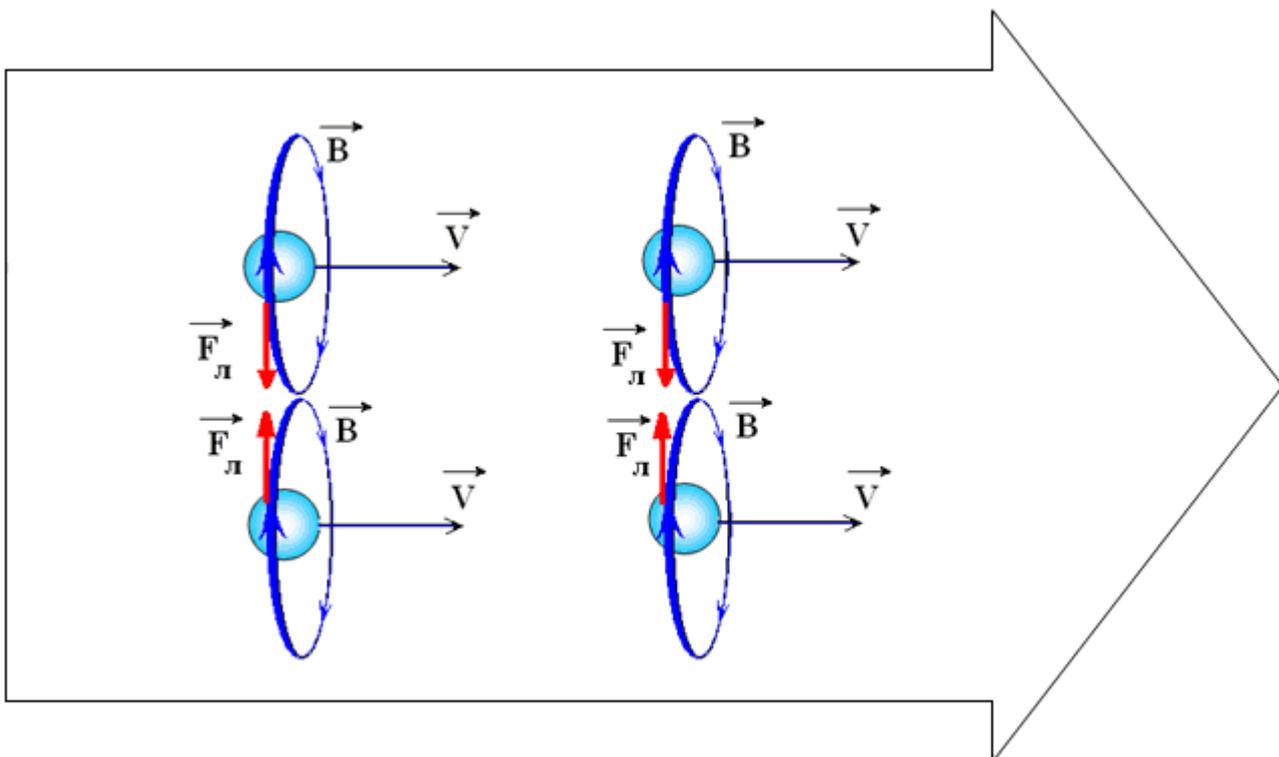
К коллективным процессам в электронном пучке относят:

1. Кулоновское отталкивание электронов пучка друг от друга, в результате, которого появляется разброс в направлениях и скоростях электронов в пучке. При этом электроны, находящиеся в «голове» пучка, ускоряются, а те, что в «хвосте», тормозятся электрическим полем соседних электронов пучка (рис. 1, а).

2. Магнитное сжатие электронного пучка. Механизм этого сжатия объясняется однонаправленным движением электронов в пучке, который можно уподобить набору элементарных токов, стремящихся притянуться друг к другу под действием магнитных полей (рис. 1, б).



$F_k$  – сила кулоновского электростатического отталкивания,  
 $V$  – скорость электронов в пучке



$F_l$  – сила Лоренца, магнитного притяжения электронов

**Рис. 1.** Коллективные взаимодействия в электронном пучке:  
**а)** электростатическое отталкивание электронов; **б)** магнитное притяжение электронов

Для того чтобы электронный пучок распространялся в вакууме, не распадаясь на отдельные электроны, и не сжимался, запираясь собственным магнитным полем, необходимо точное равенство сил электрического отталкивания электронов в пучке и их магнитного взаимодействия.

Однако при движении электронного пучка в воздухе (а именно такой процесс осуществляется при разряде линейной молнии) ситуация несколько иная, чем описана выше. Это объясняется тем, что в газовой среде уменьшение плотности объемного заряда, сосредоточенного в пучке, может достигаться не за счет развала пучка, а вследствие разлета вторичных, третичных и т.д. образованных при ионизации электронов. Если же магнитная индукция пучка достигает больших значений и стремится запереть электронный пучок к центру, то уменьшению собственного магнитного поля электронного пучка способствуют обратные токи, возникающие под действием прямого тока пучка в проводящей, тормозящей среде.

Таким образом, в газовой среде, где электронный пучок при движении непрерывно теряет свою кинетическую энергию на ионизацию, тормозится средой, он может быть более устойчивым, чем в вакууме. Конечно, не только среда воздействует на электронный пучок, но и сам пучок сильно влияет на среду, в которой он распространяется:

- во-первых, он ее разогревает, т.е. увеличивает кинетическую энергию хаотичного движения атомов и молекул;
- во-вторых, вызывает в среде целые ионизационные каскады, тем самым резко снижая ее сопротивление электрическому току и превращая, окружающий пучок, газ в плазму.

Потеря кинетической энергии электронного пучка на один акт ионизации можно определить по формуле

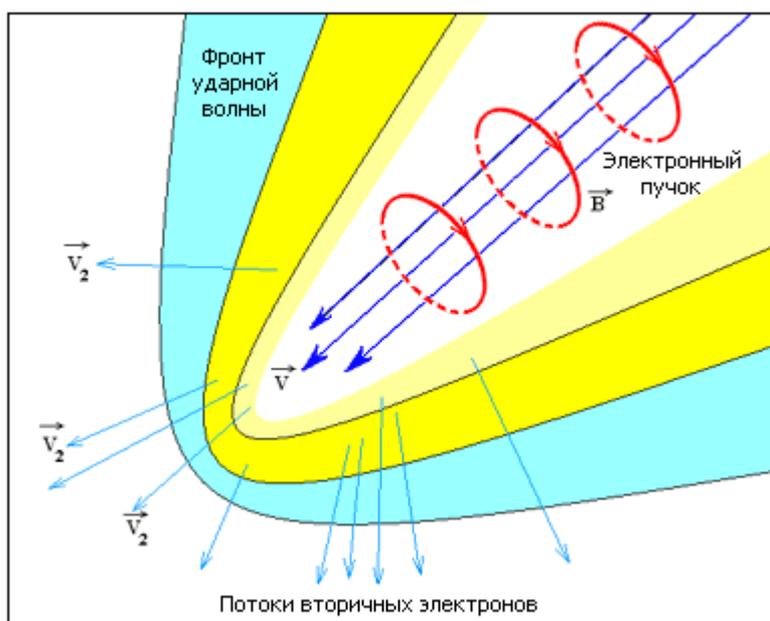
$$\Delta W = 0,6A_i \ln \frac{1,67W_0}{A_i} \quad (1)$$

где  $W_0$  – полная кинетическая энергия электронного пучка,  $A_i$  – работа ионизации атома или молекулы газа.

Тогда кинетическая энергия вторичного электрона, образованного при ионизации  $W_2$ , есть разность между  $\Delta W$  и  $A_i$ , т.е.

$$W_2 = \Delta W - A_i \quad (2)$$

В результате расчетов получим, что скорость вторичных электронов, образованных при ионизации воздуха, больше скорости электронного пучка примерно на один порядок! Таким образом, ионизационный каскад, вызванный электронным пучком в среде, протекает с большей скоростью, чем скорость движения самого пучка (см. рис. 2).



**Рис. 2.** Распространение электронного пучка линейной молнии в атмосфере с образованием потоков вторичных электронов

Однако сама среда (воздух) не является однородной, она имеет различный химический состав, следовательно, различные энергии ионизации атомов и энергии диссоциации молекул среды. Изменения в концентрации частиц воздуха, обусловлены флуктуациями его плотности, температуры и давления.

Все это делает неравноправными различные направления распространения электронного пучка в газовой среде. Причем наиболее вероятным направлением можно считать направление с минимальным сопротивлением среды. Оно определяется по значениям плотности газовой среды (а точнее – концентрацией атомов и молекул) и числом заряженных частиц в ней (ионов и электронов).

Определяющим фактором в выборе траектории являются потоки вторичных, третичных и т.д. электронов, образуемых при ионизационном каскаде в воздухе.

Условие ионизации среды вторичными электронами выражается формулой (3), где длина свободного пробега  $\lambda$  определяется из соотношения (4):

$$\frac{qE\lambda}{A_i} > 1 \quad (3)$$

$$\lambda = \frac{1}{n\sigma} \quad (4),$$

где  $q$  – модуль заряда электрона,  $E$  – напряженность электрического поля (результатирующая напряженность электрического поля электронного пучка и поля между грозовым облаком и землей),  $n$  – концентрация атомов и молекул среды,  $\sigma$  – сечение неупругого соударения, которое включает в себя:

- а) полное сечение ионизации атома или молекулы быстрым электроном;
- б) полное сечение возбуждения атома или молекулы.

Полное сечение ионизации зависит от кинетической энергии электрона до соударения и энергии ионизации атомов среды  $A_i$ .

$Z$ -число валентных электронов атома

$$\sigma_{ион} = \frac{Zq^4}{16\pi\epsilon_0^2 W_2 A_i} \quad (5)$$

Подставив формулы (4), (5) и формулы (1), (2) в формулу (3) и получим:

$$\frac{16\pi\epsilon_0^2 EA_i}{Zq^3 n_{cp}} \left( 0,6 \ln \frac{W_0}{0,6 A_i} - 1 \right) > 1 \quad (6)$$

Из формулы (6) видно, что ионизационный процесс в среде будет тем эффективнее, чем больше значение кинетической энергии вторичных электронов (а значит, меньше энергия ионизации атомов и молекул воздуха), больше напряженность электрического поля и меньше концентрация частиц среды.

При ионизационном каскаде в среде мы имеем дело не с одним вторичным электроном, а с целыми потоками вторичных, третичных и т.д. образованных при ионизации электронов с различными направлениями скорости. Направление потоков электронов, для которых суммарная величина левой части формулы (6) будет наибольшей, можно считать наиболее вероятным направлением распространения электронного пучка в газовой среде!

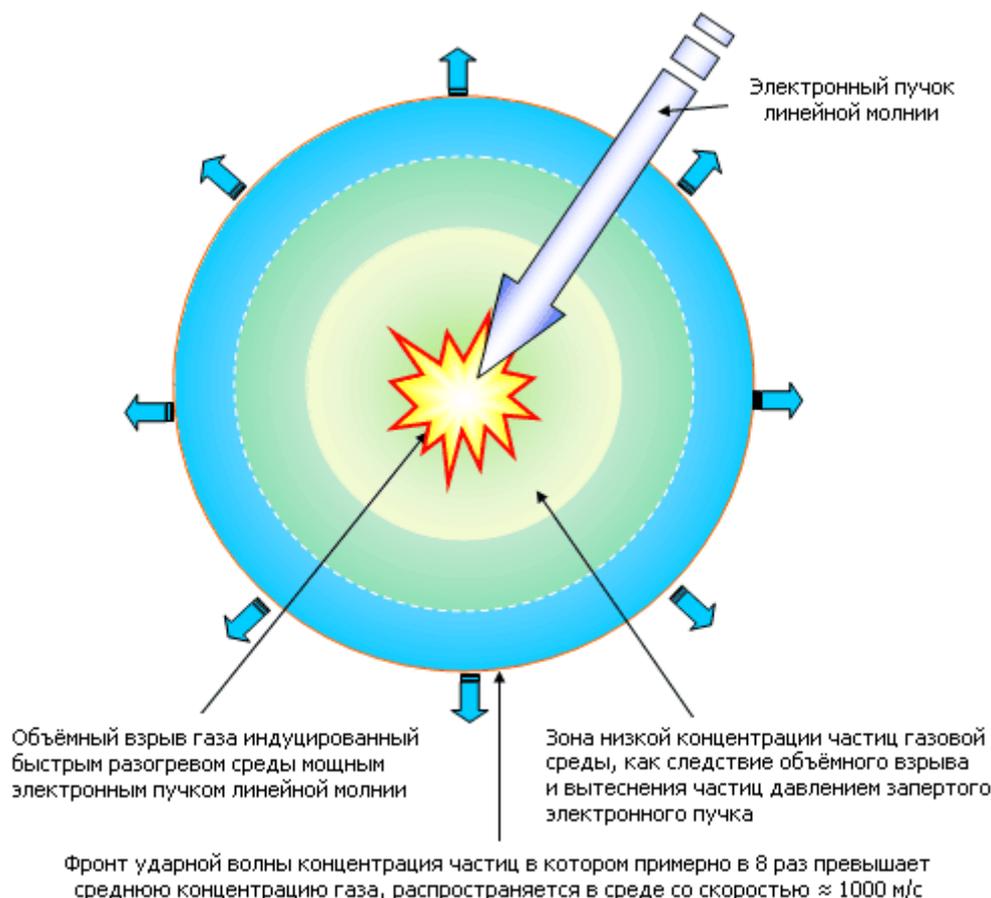
Таким образом, траектория электронного пучка в среде, или, иначе говоря, путь линейной молнии, определяется всего двумя характеристиками газовой среды: химическим составом воздуха и концентрацией атомов и молекул в нем.

## Образование шаровой молнии

Перейдем непосредственно к вопросу образования *шаровой молнии* (ШМ).

В результате процессов, сопровождающих разряд линейной молнии (теплового расширения газов, взрыва плазмы), в воздухе образуются и распространяются ударные волны, характеризующиеся высокой концентрацией атомов и молекул. Вследствие образования, наложения и определенной конфигурации ударных волн или флуктуаций концентрации частиц среды, химического состава и т.д., может сложиться такая ситуация, когда электронный пучок линейной молнии будет заперт в определенной области пространства.

Для того чтобы яснее представить этот процесс, рассмотрим простейший случай. Допустим, что на каком-то участке пути линейной молнии произошел объемный взрыв газа, инициированный быстрым разогревом газовой среды в канале молнии (рис. 3).



**Рис. 3.** Образование шаровой молнии из разряда линейной при взрыве газа

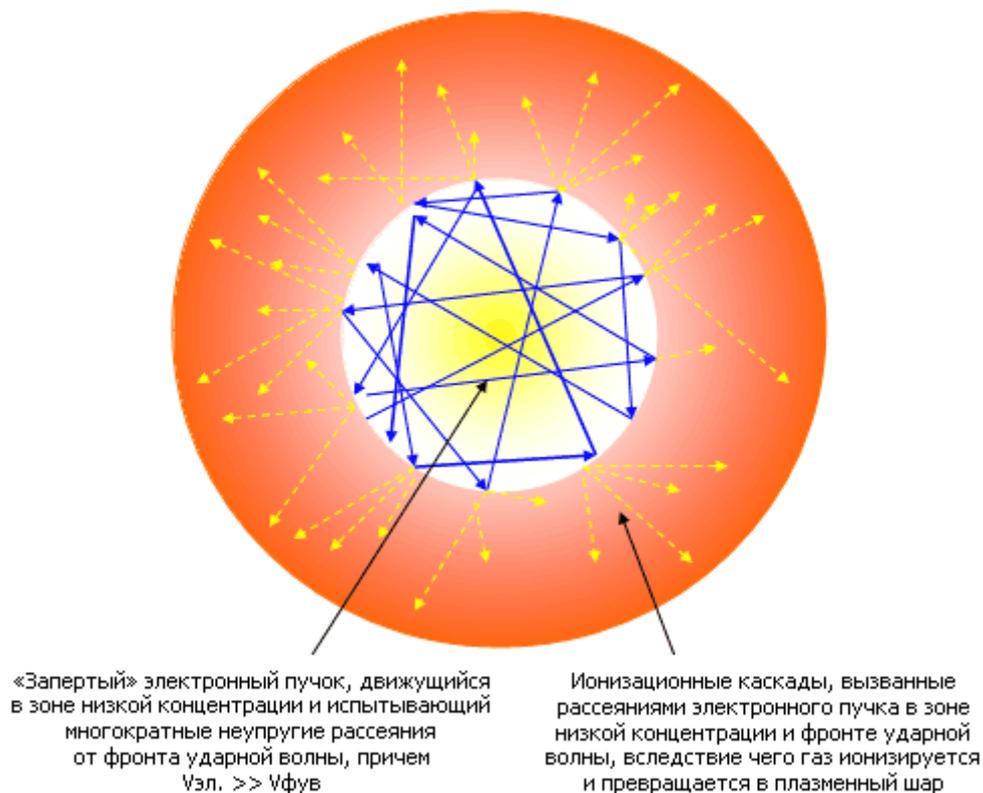
Любой взрыв в газообразной среде характеризуется образованием:

- во-первых, *фронта ударной волны* (ФУВ) распространяющимся преимущественно по сфере от центра взрыва со средней скоростью примерно 1000 м/с. Концентрация частиц в ударной волне возрастает примерно в 8 раз по сравнению со средней концентрацией в атмосфере;
- во-вторых, образуется *зона низкой концентрации* (ЗНК), являющаяся центром взрыва и находящаяся внутри сферического фронта ударной волны. Концентрация частиц в ЗНК ниже, чем средняя концентрация атомов и молекул в атмосфере. Вполне вероятно, что электронный пучок линейной молнии может попасть в ЗНК частиц среды, окруженную со всех сторон фронтом ударной волны. Для того чтобы представить дальнейшее поведение электронного пучка попавшего в ЗНК вновь обратимся к формуле (6), определяющей наивероятнейший выбор траектории пучка в среде. Напомню, выбор направления зависит от двух основных величин, характеризующих газовую среду: это концентрация частиц среды и ее химический состав. Если считать химический состав воздуха однородным, то необходимо учитывать только перепады концентраций атомов и молекул в нем.

Как показывает формула (6), наиболее ожидаемым направлением распространения пучка в газообразной среде следует считать направление с минимальной концентрацией атомов и молекул.

Движущиеся с большей скоростью потоки вторичных, третичных и т.д. электронов как бы «прощупывают» пространство вокруг электронного пучка, определяя наиболее выгодное направление.

По сути дела здесь происходят те же процессы, что определяют характер траектории линейной молнии на этапе стримера (головного разряда), при которых электронному пучку «выгоднее» двигаться в среде с низкой концентрацией, чем «пробовать» плотный слой сферического фронта ударной волны.



**Рис. 4.** Строение шаровой молнии

Можно сказать, что в поисках выхода из малой области пространства электронный пучок испытывает неупругое рассеяние от ФУВ назад в ЗНК, а, т.к. скорость распространения электронного пучка на 2...3 порядка выше скорости расширения фронта ударной волны ( $V_{эл} \gg V_{фув}$ ), то в минимальный момент времени, вследствие многократных неупругих рассеяний электронного пучка от плотной газовой сферы (рис. 4), а также вследствие ионизационных каскадов, сопровождающих каждое такое рассеяние, фронт ударной волны и газ в ЗНК становятся ионизированными и превращаются в плазму – плазменный шар. В соответствии с этим бывший ФУВ будем рассматривать как *плазменную сферу* (ПС). Кроме того, дальнейшее расширение фронта ударной волны может прекратиться вследствие огромной разности заряда электронного пучка и положительного заряда плазменной сферы, т.е. взрыв как бы замирает, а его энергия трансформируется в потенциальную энергию взаимодействия пучка и плазмы.

## Строение шаровой молнии

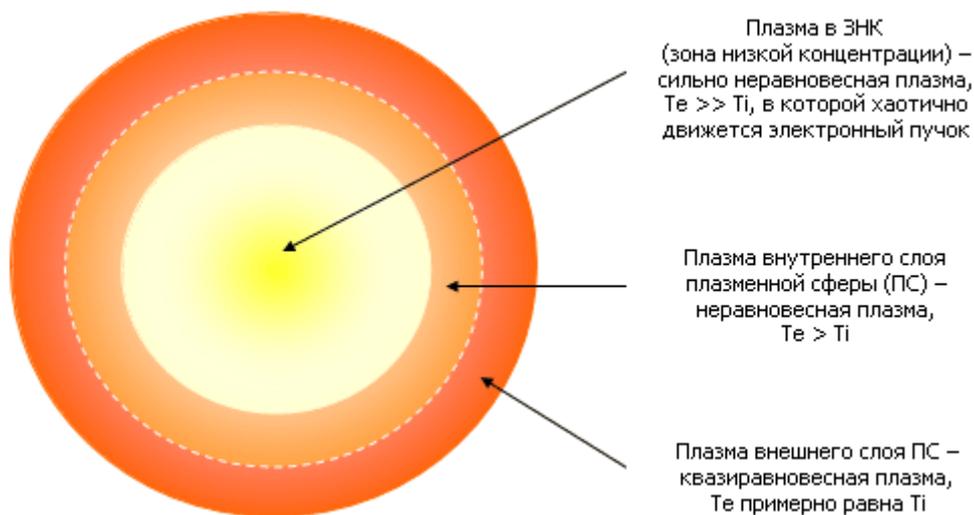
Ионизационные процессы, потеря энергии на акт ионизации и т.п., механизмы, протекающие при взаимодействии газовой среды с электронным пучком, описываются уже знакомыми формулами (1)...(6), только в них, для случая образования ШМ, под  $W_0$  следует принимать не полную кинетическую энергию электронного пучка разряда линейной молнии, а только кинетическую энергию запертого электронного пучка.

На начальной стадии образования ШМ, т.е. на стадии объемного взрыва газа и запираания электронного пучка фронтом ударной волны, обмен энергией электронного пучка со средой (а точнее передача энергии пучка газовой среде) осуществляется посредством процессов ударной ионизации атомов и молекул. При этом следует отметить, что происходит не только ионизация, но и процессы диссоциации молекул, возбуждение и разогрев газовой среды. В результате образуется система ионизированного газа (плазмы в ЗНК и ФУВ) и электронного пучка. Рассмотрим эту плазменно-пучковую систему (рис. 4).

С наибольшей кинетической энергией потоки вторичных электронов будут инициированы в среде, непосредственно прилежащей к электронному пучку, это в плазме ЗНК и внутренней поверхности плазменной сферы.

Естественно, что температура электронных потоков будет намного больше температуры ионов среды  $T_e \gg T_i$ . Таким образом, можно сделать вывод, что плазма в ЗНК и внутреннем слое ПС является неравновесной. Это усугубляется также и мощным кулоновским полем запертого электронного пучка, которое поляризует плазму, прилегающую к пучку. Однако, вследствие инициирования пространственного заряда в плазме, электрическое поле пучка экранируется, уменьшается, и во внешнем слое плазменной сферы оно практически не сказывается на свойствах плазмы. К тому же в результате потери энергии каскадных потоков электронов на ионизацию и разогрев среды во внешнем слое ПС температуры электронной и ионной компоненты плазмы выравниваются,  $T_e = T_i$  т.е. внешний слой плазменной сферы представляет собой квазиравновесную плазму.

В результате процессов экранизации заряда в плазме шаровая молния может не нести электростатического заряда, что не говорит о том, что она имеет неэлектрическую природу.



**Рис. 5.** Плазменная система шаровой молнии

Для дальнейшего рассмотрения свойств модели шаровой молнии плазменную систему шаровой молнии можно условно представить в виде трех частей (см. рис. 5):

Плазма ЗНК – сильно неравновесная плазма, где температура электронов намного превышает температуру ионов. Она характеризуется низкой концентрацией ионов и почти полным отсутствием нейтральных атомов среды, высокой поляризованностью и большими флуктуационными возмущениями, которые вызваны движением электронного пучка.

Плазма внутреннего слоя плазменной сферы – неравновесная плазма, где температура электронов плазмы выше температуры ионов. Характеризуется высокой концентрацией положительно заряженных ионов, особенно в «пограничном» слое, разделяющем плазму ЗНК и ПС, поляризованностью и, как следствие этого, большой величиной пространственного заряда в плазме.

Плазма внешнего слоя ПС – квазиравновесная плазма, где температуры электронной и ионной компоненты плазмы примерно одинаковы. Она характеризуется малой концентрацией

ионов по сравнению с нейтральными и возбужденными атомами и молекулами газа, активными рекомбинационными, возбуждающими и излучательными процессами в среде, является электрически квазинейтральной плазмой; электронейтральность сохраняется вплоть до размеров Дебаевского радиуса экранирования ( $D$ ), меньше которого электронейтральность нарушается.

Конечно, такое разделение шаровой молнии на различные плазменные слои довольно условно, но все же оно помогает глубже понять процессы, происходящие в плазме на начальном этапе ее образования.

Так, например, плазму (1) и (2) характеризуют активные ионизационные и диссоциативные процессы, в то время как плазма (3) характеризуется в основном рекомбинационными и возбуждающими процессами.

Ионизационные процессы в среде быстро затухают по мере того, как потоки вторичных электронов теряют свою кинетическую энергию вследствие неупругих рассеяний от атомов и молекул. Здесь начинает развиваться процесс, обратный процессу ионизации, -рекомбинация ионов в среде. Вероятность рекомбинации тем выше, чем дальше рекомбинирующие частицы находятся друг около друга, т.е. скорость рекомбинации определяют самые медленные электроны. Поэтому скорость эта растет с уменьшением температуры реагирующих частиц.

Наиболее медленные «тепловые» электроны в системе шаровой молнии находятся во внешнем поверхностном слое плазменной сферы (3), и именно здесь происходят активные рекомбинационные процессы. При достижении скорости рекомбинации, значения скорости ионизации в плазме шаровой молнии устанавливается т.н. динамическое ионизационное равновесие. Следствием этого ионизационного равновесия является то, что в плазме шаровой молнии поддерживается относительно постоянное число ионов.

При рассмотрении модели шаровой молнии, изображенной на рис. 5, может сложиться субъективное мнение, что шаровая молния – это замкнутая, консервативная система, состоящая из плазмы и электронного пучка, к тому же никак (кроме теплопередачи в виде излучений) с внешней средой не взаимодействующая. Однако это далеко не так, хотя бы потому, что четкой и жесткой границы между поверхностью шаровой молнии и окружающей средой не существует.

Ионы возбужденные и нейтральные атомы во внешнем, поверхностном слое ШМ (плазме (3) см. рис. 5) имеют более высокую скорость, чем частицы в окружающем воздухе, и поэтому существует большая вероятность их диффузии во внешнюю среду. При этом сама плазма ШМ будет постоянно пополняться из окружающей газовой среды, относительно «холодными» атомами и молекулами, которые в свою очередь тоже ионизируются, возбуждаются и увеличивают свою тепловую скорость при взаимодействии с электронами и ионами плазмы. Следствием этого процесса может служить то, что характеристический спектр и цвет излучения может резко изменяться при изменении химического состава газа, окружающего шаровую молнию. Кстати, есть ряд свидетельств очевидцев, описывающих изменение цвета поверхности ШМ без каких-либо внешних видимых причин.

В результате перепадов температуры в плазме ШМ и возмущений вносимых движением электронного пучка могут образовываться конвективные процессы. Хотя процесс перемешивания струй газа в плазме менее вероятен, чем процесс атомной диффузии, но именно с помощью конвективных процессов можно объяснить появление в ряде случаев «протуберанцев» на поверхности шаровой молнии.

Рассмотренный выше процесс передачи энергии электронного пучка газовой среде посредством ударной ионизации атомов и молекул является основным механизмом на начальной стадии образования шаровой молнии. Однако с образованием плазмы начинается и другой процесс, а именно: взаимодействие электронного пучка с плазменными волнами.

Одной из наиболее важных особенностей плазмы является возможность существования и распространения в ней различных типов колебаний и волн. В равновесной плазме уровень этих колебаний весьма мал, это т.н. тепловые флуктуации.

В плазме могут распространяться как линейные, так и нелинейные волны. К линейным относят волны, которые описываются в приближении малой амплитуды. К нелинейным относятся ударные волны и другие возмущения большой амплитуды, не описываемые линейным приближением. Примерами линейных волн могут служить ионнозвуковые, электромагнитные, дрейфовые и плазменные волны.

Рассмотрим из всего разнообразия колебаний в плазме только плазменные (ленгмюровские) волны.

В процессе ленгмюровских колебаний происходит обмен энергией между электростатическим полем и кинетической энергией движущихся заряженных частиц. Энергия магнитного поля этих колебаний равна нулю, поскольку вызванные токи смещения и конвективные токи компенсируют друг друга, так что средний ток в плазме равен нулю.

Ленгмюровские колебания представляют собой возмущение пространственного заряда, возникающего вследствие смещения электронов плазмы относительно ионов, при этом электростатическая сила стремится вернуть их в положение равновесия. Коллективность плазменных процессов (условие возникновения которых  $n_e D \gg 1$ ) приведет к тому, что в колебаниях сразу примет участие много электронов. Если температура плазмы относительно мала («холодная» плазма), то возникают только электростатические ленгмюровские колебания на частоте (7):

$$\nu = \sqrt{\frac{e^2 n_e}{\epsilon_0 m_e}} \quad (7)$$

где  $e$ -заряд электрона,  $n_e$  – концентрация электронов в плазме,  $m_e$  – масса электрона.

Взаимодействие поля электронного пучка с электромагнитными полями плазмы может приводить к обмену энергией между пучком и плазмой. Поскольку пучок – среда более неравновесная, более энергичная, чем плазма, обмен этот обычно сводится к передаче энергии быстрых электронов плазме и их торможению.

Необходимо отметить, что данный процесс происходит параллельно с процессом ионизации, поэтому можно сказать, что в системе шаровой молнии протекают два основных механизма передачи энергии электронного пучка газовой среде (плазме): это ударная ионизация и передача энергии пучка плазменным волнам.

Односторонняя передача энергии от электронного пучка плазме может вызвать неограниченный рост амплитуды у различных колебаний (волн), существующих в плазме: следствием этого может стать изменение состояния плазмы и даже ее распад. Этот процесс нарастания малых возмущений в плазме до высокого уровня (электрический ток в плазме, пучок быстрых частиц и т.д.) называется неустойчивостью плазмы.

Существует целый ряд такого рода неустойчивостей плазмы, развитие которых возможно при наличии конкретных причин их вызывающих. Развитие той или иной неустойчивости в плазме также связано с параметрами, характеризующими данную плазму.

Вопрос о неустойчивости плазмы лежит в основе вопроса о времени «жизни» шаровой молнии и ее завершающей стадии – стадии распада.

## Распад шаровой молнии

Если вкратце проанализировать, в применении к плазменно-пучковой системе ШМ, такие процессы взаимодействия плазмы с электронным пучком, как релаксация пучка в плазме, развитие и стабилизация пучковой неустойчивости, процессы трансформации колебаний в электромагнитные волны, образование и коллапс каверн, возникновение параметрических неустойчивостей, то с их помощью можно объяснить ряд наблюдаемых свойств шаровой молнии, в частности ее завершающей стадии: взрыва или «испарения» без образования ударных волн в среде.

Рассмотрим процесс «испарения» шаровой молнии.

В системе ШМ действуют параллельно два механизма релаксации электронного пучка при его взаимодействии с плазмой:

1) ударная ионизация (выравнивание температуры электронного пучка с температурой электронов плазмы). Осуществляется с помощью процессов ударной ионизации и возбуждения газовой среды;

2) бесстолкновительная релаксация электронного пучка в плазме – передача энергии пучка плазменным волнам. При этом в плазме развивается пучковая неустойчивость (т.е. рост амплитуды плазменных волн) которая, вследствие нелинейного взаимодействия с пучком и выходом плазменных колебаний из резонансной с пучком области, стабилизируется (прекращается ее рост).

Релаксацию можно интерпретировать также как процесс потери энергии электронного пучка с течением времени, при котором дальнейшее стационарное существование плазмы невозможно, т.к. она образовалась и поддерживалась энергией пучка.

Важную роль в релаксации электронного пучка в плазме шаровой молнии занимает время релаксации. Под «временем релаксации» следует понимать промежуток времени, в течение которого энергия пучка сравнивается с энергией теплового движения частиц плазмы. При этом увеличивается скорость рекомбинационных процессов, в результате которых плазма прекращает свое существование и превращается в обычный газ (воздух).

Если время релаксации высокоэнергетичного электронного пучка в плазме мало, т.е. за малый промежуток времени плазме передается большое количество энергии, то тепловая энергия частиц плазмы резко возрастает, что вызывает быструю диффузию ионов и электронов в окружающую среду – происходит термодинамический взрыв плазмы. При этом существенную роль могут играть также различные нестабилизированные неустойчивости, возникающие в плазме в момент быстрой релаксации пучка.

Однако в плазменно-пучковой системе ШМ более вероятен другой процесс, а именно: «медленная» релаксация пучка в плазме, в среднем от нескольких секунд до нескольких минут. Это время, по существу, и определяет время «жизни» шаровой молнии. Следует учитывать, что оно существенно зависит от энергии запертого электронного пучка и поэтому может значительно отличаться от вышеуказанной величины.

Так как процесс релаксации происходит относительно медленно, то плазма успевает путем теплопередачи, излучения и т.п. процессов отдать часть своей энергии окружающей среде, при этом температура плазмы и соответственно тепловая энергия частиц ее составляющих возрастать не будет, а значит, не будет и изменения состояния плазмы в течение всего времени торможения электронного пучка до тепловых скоростей. При этом завершающая стадия существования плазмы, а значит и ШМ (при истощении энергии электронного пучка), будет определяться только энергией рекомбинационных процессов и образования химических связей; эта энергия, как правило, невелика, и она не приводит к макроскопическим кинетическим изменениям состояния ШМ (теплового расширения газа, взрыва плазмы и т.д.). Таким образом, осуществляется процесс «испарения» шаровой молнии, на месте плазменного шара которой образуется облако газа, из которого она состояла.

Рассмотрим теперь наиболее вероятные процессы, которые могут привести к взрыву шаровой молнии.

1. К взрыву ШМ может привести развитие в ее плазме т.н. модуляционной неустойчивости, в результате которой происходит образование каверн, расположенных преимущественно в ЗНК (см. рис. 5) плазменной системы шаровой молнии, с запертыми в них квантами ленгмюровских колебаний (плазмонами). На нелинейной стадии такой неустойчивости происходит коллапс – схлопывание каверн, носящее характер взрыва.
2. В результате трансформации ленгмюровских колебаний в электромагнитные волны и распада ленгмюровской волны на ленгмюровскую и ионно-звуковую в плазме может

возникнуть параметрическая неустойчивость, следствием которой является распад плазмы в виде взрыва шаровой молнии.

Надо также отметить, что данный процесс может быть осуществлен и без механизма трансформации колебаний. Его развитие возможно при распространении в плазме любой, даже от внешнего источника, электромагнитной волны заданной частоты и амплитуды, в результате чего будет иметь место периодическая пространственно-временная модуляция параметров плазмы. Такой электромагнитной волной может служить радиоволна определенной частоты и амплитуды от внешнего излучающего источника. Рассмотренный процесс, взрыва шаровой молнии, происходит без каких-либо видимых причин, поэтому такой взрыв является практически непредсказуемым, он может произойти в любой момент времени.

3. Взрыв ШМ может быть вызван и другими причинами, в частности, взаимодействием шаровой молнии с различными предметами и веществами. Так, например, к взрыву может привести активное горение вещества, соприкоснувшегося с поверхностью шаровой молнии, контакт ШМ с металлическими предметами и т.д. При этом взрыв может сопровождаться образованием искрового разряда – это выход электронного пучка в атмосферу, т.е. процесс обратный образованию ШМ из обычной линейной.

Можно только предполагать, какие процессы при этом развиваются. Возможно, что происходит нарушение равновесия в сбалансированной системе шаровой молнии, приводящее к развитию различных неустойчивостей, изменению состояния плазмы и ее взрыву.

Конечно, описанная выше завершающая стадия шаровой молнии ее мирное «испарение» и взрыв – это лишь возможный вариант поведения предложенной модели. Абсолютно точно предсказать завершающую стадию шаровой молнии практически не представляется возможным, т.к. все ее описание носит статистический, приближенный характер. Но все же попробуем определить основные свойства этой плазменно-пучковой модели шаровой молнии.

## Свойства шаровой молнии

### Химический состав

Химический состав плазмы шаровой молнии определяется составом газа на момент ее образования и химическим составом окружающего воздуха. Химический состав плазмы ШМ может быть разнообразным, но состав поверхности шаровой молнии, как правило (вследствие диффузии), определяется химическим составом окружающего воздуха. При этом помимо типичных групп молекул, входящих в состав воздуха, в плазме могут образовываться и существовать и другие типы молекул, например  $O_3$ ,  $NO_2$ ,  $NO$  и т.п.

Кстати, есть свидетельства очевидцев, что при появлении шаровой молнии или сразу после ее «испарения» либо взрыва в воздухе возникает специфический запах озона, оксидов азота или запах серы. Оксиды серы в шаровой молнии могут появиться при ее образовании либо нахождении в пыльной, задымленной атмосфере, богатой различными летучими оксидами.

### Излучение и спектр шаровой молнии

Шаровая молния является активным излучателем энергии. Излучение ШМ состоит из двух видов:

- корпускулярные потоки – потоки релятивистских электронов;
- электромагнитное излучение.

Источником релятивистских электронов в системе шаровой молнии является электронный пучок. В электронном пучке, как уже отмечалось выше, действуют параллельно два механизма коллективного взаимодействия – электростатическое отталкивание электронов пучка и их магнитное притяжение при однонаправленном движении. Если же какой то из электронов пучка по каким-либо причинам (флуктуационным процессам, различным взаимодействиям) изменяет свое направление движения, которое не совпадает с направлением распространения электронного пучка в целом, то действие магнитных сил на такой «отбившийся» электрон

прекращается. Но действие электростатического поля пучка продолжается, при этом электрон ускоряется до релятивистских скоростей в направлении от пучка. В системе шаровой молнии не только электронный пучок воздействует на среду (газ, плазму), но и среда оказывает на него обратное влияние, внося в его коллективные взаимодействия возмущения, которые могут приводить к потере электронов электронным пучком. Т.о. могут возникать целые потоки релятивистских электронов. Эти потоки, как правило, слабо взаимодействуют с атомами и молекулами газа и поэтому могут иметь достаточно большую длину пробега в воздухе (несколько метров).

Взаимодействуя с ионами и атомами плазмы шаровой молнии релятивистские электроны (т.к. они обладают достаточно большой энергией) возбуждают в них электроны, находящиеся на низших электронных уровнях. При переходе ионов и атомов из возбужденного в основное состояние они излучают рентгеновское излучение. Кроме того, рентгеновское излучение способен давать сам электронный пучок вследствие резкого изменения направления его распространения при рассеянии на внутреннем слое ПС.

Потоки вторичных, третичных электронов, образованных при ионизационном каскаде в плазме, имеют тоже достаточно большую энергию и могут возбуждать в атомах, ионах и молекулах ультрафиолетовую область спектра. Такое ультрафиолетовое излучение плазмы шаровой молнии может иметь большую интенсивность.

Шаровая молния излучает почти весь видимый спектр электромагнитных излучений. Но цвет ее (т.е. преобладающая область видимого спектра) зависит, прежде всего, от химического состава окружающего воздуха т.к. активные излучательные процессы (видимого спектра) в системе ШМ происходят во внешнем слое, который непосредственно прилегает к окружающей среде. Допустим, что шаровая молния находится в обычном воздухе, тогда спектр ее видимого излучения определяет азот, так как его в воздухе 78%. Преобладающий цвет видимого спектра азота лежит в желто-оранжевом диапазоне. Тогда становится понятным, почему в большинстве случаев наблюдали именно желто-красную шаровую молнию. Хотя, если процентное содержание элементов и химических соединений в воздухе другое, то цвет (а возможно, и весь спектр) может быть другим. Стоит отметить, что если энергия запертого электронного пучка велика, то цвет ШМ может быть ярко белым и даже голубым.

Плазма ШМ разогрета по сравнению с окружающим воздухом до относительно высокой температуры, примерно 4000...5000 К, и поэтому она, естественно, является мощным источником инфракрасного излучения.

Вследствие распадной неустойчивости и флуктуаций в плотности частиц плазмы ленгмюровские колебания в плазме могут трансформироваться в электромагнитные волны. Т.о., шаровая молния может быть источником и радиоволн различной частоты и амплитуды.



**Рис. 6.** Области наивероятнейшей генерации излучений в системе шаровой молнии

Все описанное выше, касающиеся излучения шаровой молнии, можно представить более наглядно, разбив систему ШМ, представленную на рис. 5, на области наивероятнейшей генерации того или иного типа излучения (рис. 6).

### **Температура шаровой молнии**

Если исходить из теоретической модели ШМ, изображенной на рис. 5, то видно, что она имеет довольно сложную структуру и состоит как из равновесной, так и из неравновесной плазмы. Процессы, происходящие в неравновесной плазме, носят настолько нестационарный характер, что теряет смысл само понятие температуры плазмы. В такой плазме температура оценивается отдельно для каждого из компонентов ее составляющих – электронов и ионов. Резко отличная ситуация в равновесной плазме шаровой молнии, где температура любого из компонентов плазмы характеризует температуру плазмы в целом.

Видимый спектр излучения определяется в основном температурой электронной компоненты плазмы. Так, например, для желтой ШМ температура электронной компоненты должна составлять (по закону Вина) примерно 5000 К, а для красной – около 4000 К. Но электронная температура еще не говорит о том, что это температура поверхности шаровой молнии. Хотя что в данном случае считать поверхностью шаровой молнии – ее излучающую (видимую) поверхность, которая характеризуется температурой электронов порядка 5000 К, или поверхность с равновесной плазмой, которая может иметь температуру меньшую или равную температуре электронов в излучающем, видимом слое?

Градиент температуры в системе шаровой молнии убывает по мере продвижения от центральной области (см. рис. 6) к внешней поверхности. Однако сама ШМ, как это уже отмечалось выше, не имеет каких-либо четко определенных границ поверхности, поэтому на вопрос о температуре поверхности шаровой молнии можно дать лишь приближенный ответ. Из всего сказанного выше можно сделать вывод, что температура ШМ должна составлять величину примерно 5000 К.

Естественно, что чем ближе к центру шаровой молнии, тем будет выше температура, а соответственно будет сильнее тепловое воздействие на контактирующие с ней предметы и вещества.

В большинстве же случаев температура шаровой молнии оценивалась по ее тепловому действию на различные предметы (дерево, металлы, стекло и т.д.), без учета «глубины» проникновения тел в шаровую молнию (при одинаковом времени контакта), а значит, давалась различная оценка температуры ее поверхности.

Т.о., для одной и той же шаровой молнии может быть получен целый спектр различных температур, что является абсурдом с точки зрения тех теорий ШМ, которые рассматривали ее как однородную среду с равномерно распределенной температурой по объему, но что является вполне объяснимым в рамках данной модели.

### **Звуковые эффекты, сопровождающие шаровую молнию**

В результате существующих в плазме различных типов колебаний, флуктуаций, развития различных неустойчивостей, в ней могут генерироваться звуковые колебания различной интенсивности.

По существу, «шумит» любая плазма, отличие лишь составляет, величина мощности и частота звуковых колебаний, но в ряде случаев наблюдалась и бесшумная шаровая молния.

### **Распределение электрического заряда в шаровой молнии**

Как уже отмечалось выше, в системе ШМ имеет место значительное неравномерное распределение электрического заряда. Понятно, что отрицательный заряд ШМ сосредоточен в ЗНК там, где движется электронный пучок, плазма ЗНК имеет высокую степень ионизации, но её положительный заряд не способен полностью экранировать мощное электрическое поле пучка, поэтому существует сильная поляризация ПС. Следствием этой поляризации служит

то, что на внутреннем слое ПС имеется высокая концентрация положительно заряженных ионов плазмы, которая радиально убывает к внешнему слою плазменной сферы из-за эффекта экранирования заряда. Т.о. во внешнем слое ПС концентрации электронной и ионной компонент плазмы одинакова и плазма электронейтральна.

## **Заключение**

Все описание шаровой молнии с момента ее образования и до момента ее распада в данной теории носит приближенный, статистический характер. Но даже такое «грубое» описание шаровой молнии, позволяет объяснить ряд ее наблюдаемых свойств.

Кстати проведенное компьютерное моделирование и расчеты данной плазменно-пучковой модели показали, что среднее время «жизни» шаровой молнии может достигать нескольких минут. Имеются некоторые предположения по созданию ШМ в лабораторных условиях, но только на установках способных давать мощный искровой разряд.

### **Список литературы:**

1. Никеров В.А. «Электронные пучки за работой», М.: Энергоатомиздат, 1988 г.
2. Стаханов И.П. «О физической природе шаровой молнии», М.: Энергоатомиздат 1985 г.
3. Кролл Н., Трайвелпис А. «Основы физики плазмы», М.: 1975 г.
4. Смирнов Б.М. «Введение в физику плазмы», М. 1975 г.
5. Франк-Каменский Д.А. «Плазма четвертое состояние вещества», «Лекции по физике плазмы», М.: 1968 г.
6. Яворский Б.М., Детлаф А.А. «Справочник по физике», М.: Наука, 1990 г.
7. Иванов Б.Н. «Законы физики», М.: Высшая школа, 1986 г.