**Содержание.**

# Цель.

**Теоретическое положение.**

1. **Введение.**

**3. Ток в газах.**

**3.1 Ионизация и рекомбинация.**

**3.2 Ионизация электронными ударами.**

**3.3 Самостоятельный и несамостоятельный разряд.**

**4. Разряды.**

**4.1 Виды разрядов.**

**4.2 Искровой разряд.**

**5. Исторические воззрения на молнии.**

**6. Молния.**

**6.1 Виды молний.**

**6.2 Физика линейной молнии.**

**7. Загадка шаровой молнии.**

**7.1 Итоги обработки наблюдений.**

**7.2 Гипотезы.**

**Практическое задание.**

**2. Введение.**

Термином **газовый разряд**пользуются, когда хотят сказать, что в газообразной среде протекает электрический ток, Электрические токи в газах разнообразны во многих отношениях. Они могут отличатся между собой не только по величине и длительности, но и по происходящим в них физическим процессам, в первую очередь по тем процессам, которыми обусловлена электрическая проводимость газа, т.е. появления в нем свободных носителей заряда. Различие в механизме возникновения и поддерживания проводимости отражается как во «внешнем виде» явления (т.е. в интенсивности, спектре, пространственном и временном распределении его излучения), так и в его электрических характеристиках – внешних (вольтамперная, вольтсекундная и т.д.) и внутренних (пространственное и временное распределение электрического поля, плотности тока, объемных зарядов, концентрации электронов ионов и т.д.).

Ввиду такого разнообразия видов токов в газах, систематическое изучение их требует классификации, которую естественно проводить либо его внешним (феноменологическим) признаком различных видов тока, либо по существу происходящих физических процессов.

Токи проводимости в газах делятся на **самостоятельные и несамостоятельные.** Это деление связано с основным свойством газа – быть непроводником тока в нормальном состоянии. Вследствие этого свойства газа для возникновения в нем тока проводимости требуется:

1. появление в газе свободных носителей заряда (электронов и ионов), т.е. возникновение проводимости;
2. сообщение этим носителям направленного движения.

Если в газе наложенное на него электрическое поле осуществляет обе функции в такой степени, что для обеспечения тока, достаточно поддерживать только это поле, то такой ток называется **самостоятельным*.*** В случаях, когда для поддержания тока в газе необходим внешний источник ионизации и устранение которого приводит исчезновению тока, ток называется **несамостоятельным**.

Самостоятельные токи, как и все физические явления, можно разделить по основному критерию динамики – по протеканию явления времени – на установившиеся и неустановившиеся.

К **неустановившимся** (стационарным) **токам** следует относить только токи, сила которых не меняется с течением времени (i=const), а всякий ток сила которого переменна во времени считают **неустановившимися*.***

Удобно выделить 3 типа стационарного газового разряда (тока), в зависимости от переменного им тока:

1. **Таунсендовский**, или **темный разряд**(ток разряда не выше 10-6А).

Это самостоятельный ток, протекающий в однородном или слабо неоднородном поле. Плотность этого тока настолько мала, что он не сопровождается заметным свечением (отсюда название); имеет место преимущественно при низком давлении газа.

1. **Тлеющий разряд**(ток приблизительно от10-6 до 10-1 А).

Электрическое поле обладает наибольшей напряженностью в ограниченной области катода. Для этого вида разряда верно равенство

Uk>>Ui,

Uk – катодное потенциала;

Ui – ионизированный потенциал газа.

Возникает при низких давлениях.

1. **Дуговой разряд** (ток около 10-1 А и выше)

Электрическое поле также обладает наибольшей напряженностью. Но для данного разряда характерно следующей неравенство

Uk< Ui

Нестационарные разряды, или *искры* могут возникать в широком диапазоне токов и давлений. К ним можно отнести В4 – токи (высококачественные). Например, «факельный разряд» - В4 – ток при высоком давлении. Однако классифицировать, нестационарные разряды нелегко, но в принципе в этом и нет необходимости.

Появление самостоятельного тока в газе (*пробой газа*), называемый также «зажиганием», связан с появлением значительной проводимости в газе, ранее не проводившем вовсе. Для начала пробоя необходимо, чтобы в газовом промежутке были свободные носители заряда – электроны, ионы (хотя бы один электрон). Здесь возможны два случая:

1. свободные носители заряда появляются под действием постороннего фактора (таким образом происходит переход несамостоятельного иона в самостоятельный.
2. свободные носители остались от предыдущего прохождения самостоятельного тока – случай «*повторного зажигания*».

Пробой газа происходит за время движения электронных лавин и может быть порядка 10-7 сек. и даже меньше.

Процессом, обратным возникновению самостоятельного тока в газе его происхождение («*гашение*»). С ним связано явление остаточной проводимости и ее распада (*деионизации газа*), а также различные виды остаточных токов (например, обратные токи ионных вентилей). Исчезновение газовой проводимости длится 10-5 сек и более.

Газовые разряды в природных условиях – привычное явление, это – молнии и полярные сияния, образующиеся в верхней атмосфере при очень низком давлении.

**3. Ток в газах.**

**3.1 Ионизация и рекомбинация газов.**

Газы при нормальных условиях состоят из электрических нейтральных атомов и молекул и по этой причине не проводят электричества. Газ становится проводником, когда некоторая часть его молекул ионизируется, т.е. произойдет расщепление нейтральных атомов и молекул на положительные и отрицательные ионы и свободные электроны – такие газы называют *ионизированными*. Ионы в газах могу4т возникать под действием ионизаторов (*возбудители ионизации*) – высокой температуры, рентгеновских и ультрафиолетовых лучей, радиоактивного излучения, а также в результате столкновения атомов газа с электронами и атомными частицами и т.д.

Впрочем, и в нормальных условиях газы, например воздух, обладают электрической проводимостью, хотя и весьма ничтожной. Эта проводимость вызвана излучением радиоактивных веществ, имеющихся на поверхности Земли, а также космическими лучами.

Систематическое излучение электрических токов и разрядов в газах было начато лишь в конце 19 века. Была установлена природа газового разряда в различных условиях. Газовым разрядом называется прохождение электрического тока через газы. Однако ввиду сложности этих явлений, точной количественной теории их не существует до настоящего времени.

Ионизация газа, возникающая в результате вырывания электронов из молекул и атомов самого газа, называется *объемной ионизацией*, т.к. источники ионов здесь распределены в объеме, который занимает газ. Помимо объемной ионизации существует *поверхностная ионизация.* При такой ионизации ионы или электроны поступают в газ со стенок сосуда, в котором он заключен, или с поверхности тел, вносимых в газ. Например, источником электронов могут служить раскаленные тела (термоэлектронная эмиссия) или поверхности металлов, освещаемые ультрафиолетовыми и прочими коротковолновыми электромагнитными излучениями (фотоэлектрический эффект).

Для того чтобы выбить из молекулы (атома) один электрон, необходимо затратить определенную энергию. Минимальное значение такой энергии называется *энергией ионизации* молекулы (атома), ее значение для атомов различных веществ лежат в пределах 425эВ.



Одновременно с процессом ионизации газа всегда идет и обратный процесс – процесс *рекомбинации:* положительные и отрицательные ионы и молекул. Чем больше ионов возникает под действием ионизатора, тем интенсивнее идет и процесс рекомбинации. В результате рекомбинации проводимость газа пропадает или возвращается к своему исходному значению.

Как говорилось выше, для отрыва электрона от атома (ионизация атома) необходима затрата определенной энергии. При рекомбинации положительного иона и электрона эта энергия, напротив, освобождается. Чаще всего она излучается в виде света, и поэтому рекомбинация ионов сопровождается свечением (*свечение рекомбинации*). Если концентрация положительных и отрицательных ионов велика, то и число ежесекундно происходящих актов рекомбинации также будет большим, и свечение рекомбинации может быть большим, и свечение рекомбинации может быть очень сильным.

Ионизация под действием внешнего ионизатора принимается во внимание только в случае сравнительно слабых электрических полей, когда кинетическая энергия eEL, накопленная электроном (или ионом) на длине свободного пробега L меньше энергии ионизации Ei

eEL<Ei

и, следовательно, при столкновении с нейтральными частицами электроны лишь изменяют направление движения (*упругое рассеяние*).

Помимо данной ионизации возможна ионизация электронными ударами.

**3.2 Ионизация электронными ударами.**

Данный процесс заключается в том, что свободный движущийся электрон, обладающий достаточной кинетической энергией при соударении с нейтральным атомом выбивает один (или несколько) из атомных электронов. В результате этого нейтральный атом превращается в положительный ион, (который также может ионизировать газ) и, кроме первичного, появляются новые электроны, которые ионизируют еще атомы, Таким образом, число электронов будет лавинообразно нарастать, этот процесс называется *электронной лавиной.* Этот вид ионизации наблюдается при сильных полях, когда

eEL<Ei .

Для количественной характеристики ионизирующей способности электронов и ионов Таунсенд (1868 – 1957) ввел два «*коэффициента объемной ионизации*» *и .* определяется как среднее число ионов одного знака, производимое электроном на единице длины своего пути. Такой же смысл имеет коэффициент *,* характеризующий ионизующую способность положительных ионов. Коэффициент ионизации электронами значительно превосходит коэффициент ионизации положительными ионами .



Следующий классический опыт Таунсенда доказывает это утверждение.

**Опыт:** *Берется Ионизационная камера в виде цилиндрического конденсатора, внутренним электродом которого служит тонкая металлическая нить (рис. 1). Между нитью и наружным цилиндром конденсатора прикидывается разность потенциалов V, достаточная для того, чтобы в объеме камеры происходила* ***ударная ионизация*** *газа. Последняя практически будет происходить лишь вблизи нити, где электрическое поле очень сильное, Допустим, что на нить подан положительный потенциал. Тогда к нити устремятся электроны и будут вблизи нее ионизовать газ. Положительные же ионы, устремляясь к наружному цилиндру, пройдут через область слабого поля и практически никакой ионизации не вызовут. Изменим теперь полярность напряжения V не меняя его величину. Тогда роли положительных и отрицательных ионов поменяются местами. К нити устремятся положительные ионы, и ионизация в камере будет возбуждаться практически только ими. Опыт показывает, что в первом случае ионизационный ток больше и быстрее растет с напряжением V, чем во втором (рис. 2 кривая I относится к случаю когда внутренний электрод положителен, а кривая II – к случаю когда он отрицателен).*

**Таким образом, главную роль играет ионизация ударами электронов**, по сравнению с которой ионизацией положительными ионами во многих случаях можно пренебречь.

* 1. **Самостоятельный и несамостоятельный разряд.**

Прежде, чем перейти к рассмотрению теории Таунсенда дадим понятие самостоятельного и несамостоятельного разряда.

Разряд, существующий только при действии внешнего ионизатора, называется **несамостоятельным разрядом**.

Если ионы, необходимые для поддержания электропроводимости газа, создается самим разрядом (в результате процессов происходящих в разряде), такой газовый разряд называется **самостоятельным.**

Теория Таусенда прохождения электрического тока через газ.

В ней учитывается ударная ионизация атомов и молекул газа электронами и положительными ионами. Для простоты электроды разрядной трубки будем считать плоскими. Рекомбинацией ионов и электронов пренебрежем, предполагая, что за время прохождения между катодом и анодом эти частицы рекомбинировать не успевают. Кроме того, ограничимся стационарным режимом, когда все величины, характеризующие разряд, не зависят от времени. Поместим начало координат на поверхность катода К, направив ось Х в сторону анода А. Пусть ne(x) и np(x) – концентрации электронов и положительных ионов, а ve и vp – их средние дрейфовые скорости. Возьмем в газе бесконечно тонкий плоский слой. Через эту площадку слева в слой ежесекундно входит ne(x) vp(x) электронов, а справа выходит ne(x+dx) ve(x+dx). В объеме dx слоя из-за ионизации электронами ежесекундно возникает ne vedx электронов и столько же положительных ионов, Аналогично из-за ионизации положительными ионами образуется npvpdx электронов и столько же положительных ионов. Наконец, может существовать внешний источник ионизации, создающий ежесекундно q пар ионов в единице объема газа. А так как в случае стационарности процесса число электронов в слое не меняется, то должно выполнятся соотношение



ne(x)ve(x)-ne(x+dx)ve(x+dx) + (neve + npvp)dx +qdx=0



## Аналогично, для положительных ионов, движущихся от анода к катоду,

np(x+dx)vp(x+dx) – np(x)vp(x) + (neve + npvp)dx +qdx=0



Заменяя разности соответствующими дифференциалами и сократив на dx, получим

(1) - d(neve )/dx + neve + npvp +q=0



d(npvp)/dx + neve + npvp +q=0



Введем плотности электрического тока электронов и положительных ионов:

(2)

## Тогда (3)

Отсюда и, следовательно,

(4)

Таким образом, полная плотность электрического тока j остается постоянной на всем протяжении от катода к аноду, как это и должно быть для квазистационарных процессов. Исключив теперь из уравнений (3) и (4) ток , получим

(5)

Оба коэффициента ионизации и зависят не только от рода газа, но также от давления и напряженности электрического поля. Давление газа постоянно по всей величине разрядной трубки. Что касается поля Е из-за наличия пространственных зарядов неоднородно, т.е. зависит от х. Однако Таунсенд ввел упрощающее предположение:

1. поле Е считается однородным во всем объеме разрядной камеры;
2. а коэффициенты постоянными, независимыми от х.

Это может выполнятся для сравнительно слабых токов, когда пространственные заряды, возникающие в объеме камеры, несущественны. Поэтому теории Таусенда применима лишь в начальной стадии разряда. Разряд, для которого это условие выполняется, называется таунсендовским. Пренебрежение пространственными зарядами – существенный недостаток теории Таунсенда.

Предполагая *,* и q постоянными и интегрируя уравнение (5), находим je, а затем и jp:



(6)

где С – постоянная интегрирования. Она найдется из граничных условий, которые должны выполнятся на электродах.

Чтобы написать эти граничные условия, найдем сначала ток электронов и ток ионов, производимые объемным ионизатором. Число таких электронов, производимых во всем объеме камеры в одну секунду, будет Slq, а заряд, который они несут, Slqe, где S – площадь поперечного сечения камеры, l – ее длина, lqe – плотность электронного тока, создаваемого положительными ионами. На аноде это и будет полная плотность тока положительных ионов. Таким образом, граничное условие на аноде имеет вид

(7)

где, (а) означает, что соответствующая величина берется на поверхности анода, (к) означает тоже самое для катода.

**Граничное условие на поверхности катода.**

Предположим, что имеется внешний источник, создающий поверхностную ионизацию на катоде. Это могут быть рентгеновские или ультрафиолетовые лучи, освещающие поверхность катода. Или высокая температура, при которой происходит термоэлектронная эмиссия. Обозначим через N число электронов, выходящих ежесекундно с единицы поверхности ионизатора. Они вносят в плотность электронного тока слагаемое Ne. К нему надо добавить плотность электронного тока qle, создаваемое объемным ионизатором, а также плотность тока, создаваемого электронами, вырываемыми из катода положительными ионами (вторичная эмиссия). На единицу площади катода падает ежесекундно положительных ионов. Если среднее число электронов, вырываемых из катода одним положительным ионом. Тогда с единицы поверхности катода будет вырываться ежесекундно электронов, которые создадут электронный ток . Заметим, что на границе катода с газом эмиссия электронов может происходить в результате фотоэффекта и ударов других частиц. Однако, Таунсенд для простоты учитывает только эмиссию электронов с катода вызываемую только ударами положительных ионов. При таком упрощении полная плотность электронного тока у катода будет



(8)

Это и есть граничное условие на поверхности катода.

Совместно решая уравнения (6), (7), (8) получим

(9)

где введены обозначения

(10)

Из формулы (9) видно, что при конечный ионизационный ток получается лишь при наличии внешних ионизаторов. В этом случае разряд остается несамостоятельным. Коэффициенты *,* и зависят от напряженности электрического поля Е. С увеличением Е ионизационный ток j растет. При некотором значении поля обращается в 0. Если убрать внешние ионизаторы, то в случае ток через газ все же будет идти. Разряд становится самостоятельным. При выполнении условия



(11)

согласно теории Таунсенда, происходит пробой газа, или зажигание газового разряда.

(\*) Теория Таунсенда в дальнейшем подвергалась многочисленным дополнениям и уточнениям. Таунсенд учитывал ионизацию только электронами и положительными ионами. Между тем в разряде могут происходить и другие процессы, приводящие к возникновению электронов. Таким процессом может быть освобождение электронов с катода, вызванное излучением самого разряда (так называемый **фотоэлектрический эффект**); в результате фотоэффекта на атомах газа (фотоионизация). Также нужно учесть и изменения электрического поля, которое вызывается объемными зарядами при ионизации газа. Эти процессы имеют место в газовом разряде одновременно, и поэтому точная теория самостоятельных газовых разрядов весьма сложна и не завершена в настоящее время. Однако, теория Таунсенда, несмотря на большое количество упрощений и недостатков, хорошо предлагает основную сущность возникновения самостоятельного разряда.

**4. Разряды.**

* 1. **Виды разрядов.**
* темный (таунсендовский);
* тлеющий;
* дуговой;
* коронный;
* искровой.
  1. **Искровой разряд.**

Этот разряд характеризуется прерывистой формой (даже при пользовании источниками постоянного тока). Он возникает в газе обычно при давлениях порядка атмосферного. В естественных природных условиях искровой разряд наблюдается в виде молний. По внешнему искровой разряд представляет собой пучок ярких зигзагообразных разветвляющихся тонких полосок, мгновенно пронизывающих разрядный промежуток, быстро гаснущих и постоянно сменяющих друг друга. Эти полоски называют **искровыми каналами**. Они начинаются как от положительных, так и от отрицательных, а также от любой точки между ними. Каналы, развивающиеся от положительного электрода, имеют четкие нитевидные очертания, а развивающиеся от отрицательных – диффузные края и более мелкое ветвление.

Т.к. искровой разряд возникает при больших давлениях газа, то потенциал зажигания очень высок. (Для сухого воздуха, например, при давлении 1 атм. и расстоянии между электродами 10 мм, пробивное напряжение 30 кВ.) Но после того как разрядный промежуток «искровым» каналом, сопротивление промежутка становится очень малым, через канал проходит кратковременный импульс тока большой силы, в течение которого на разрядный промежуток приходится лишь незначительное сопротивление. Если мощность источника не очень велика, то после такого импульса тока разряд прекращается. Напряжение между электродами начинает расти до прежнего значения, и пробой газа повторяется с образованием нового искрового канала.

Электрическая искра возникает в том случае, если электрическое поле в газе достигает некоторой определенной величины Ек (**критическая** напряженность поля или **напряженность пробоя**), которая зависит от рода газа и его состояния. Например, для воздуха при нормальных условиях Ек3\*106 В/м.



Величина Ек увеличивается с увеличением давления. Отношение критической напряженности поле к давлению газа р для данного газа остается приблизительным в широкой области изменения давления: Ек/рconst. (Этот закон можно обосновать с помощью Таунсенда).



Время нарастание напряжения тем больше, чем больше емкость С между электродами. Поэтому включение конденсатора параллельно разрядному промежутку увеличивает время между двумя последующими искрами, а сами искры становятся более мощными. Через канал искры проходит большой электрический заряд, и поэтому увеличивается амплитуда и длительность импульса тока. При большой емкости С канал искры ярко светится и имеет вид широких полос. То же самое происходит при увеличении мощности источника тока. Тогда говорят о конденсированном искровом разряде, или о конденсированной искре. Максимальная сила тока в импульсе, при искровом разряде, меняется в широких пределах, в зависимости от параметров цепи разряда и условий в разрядном промежутке, достигая нескольких сотен килоампер. При дальнейшем увеличении мощности источника, искровой разряд переходит в **дуговой разряд**.



В результате прохождения импульса тока через канал искры в канале выделяется большое количество энергии (порядка 0,1 – 1 Дж на каждый сантиметр длины канала). С выделением энергии связано скачкообразное увеличение давления в окружающем газе – образование цилиндрической **ударной волны**, температура на фронте которой ~104 К. Происходит быстрое расширение канала искры, со скоростью порядка тепловой скорости атомов газа. По мере продвижения ударной волны температура на ее фронте начинает падать, а сам фронт отходит от границы канала. Возникновение ударных волн объясняются звуковые эффекты, сопровождающие искровой разряд: характерное потрескивание в слабых разрядах и мощные раскаты в случае молний.

В момент существования канала, особенно при высоких давлениях, наблюдается более яркое свечение искрового разряда. Яркость свечения неоднородна по сечению канала имеет максимум в его центре.

Рассмотрим механизм искрового разряда.

В настоящее время общепринятой считается так называемая **стримерная теория искрового разряда**, подтвержденная прямыми опытами. Качественно она объясняет основные особенности искрового разряда, хотя в количественном отношении и не может считаться завершенной. Если вблизи катода зародилась электронная лавина, то на ее пути проходит ионизация и возбуждение молекул и атомов газа. Существенно, что световые кванты, испускаемые возбужденными атомами и молекулами, распространяясь к аноду со скорость света, сами производят ионизацию газа, и дают начало первым электронным лавинам. Таким путем во всем объеме газа появляются слабо святящиеся скопления ионизированного газа, называемые стримерами. В процессе своего развития отдельные электронные лавины догоняют друг друга и, сливаясь вместе, образуют хорошо проводящий мостик из стримеров. По этому в последующий момент времени и устремляется мощный поток электронов, образующий канал искрового разряда. Поскольку проводящий мостик образуется в результате слияния практически одновременно возникающих стримеров, время его образования много меньше времени, которое требуется отдельной электронной лавине для прохождения расстояний от катода к аноду. Наряду с **отрицательными стримерами**, т.е. стримерами, распространяющимися от катода к аноду, существуют также **положительные стримеры**, которые распространяются в противоположном направлении.

1. **Исторические воззрения на молнии.**

Молния и гром первоначально воспринимались людьми как выражение воли богов и, в частности, как проявление божьего гнева. Вместе с тем пытливый человеческий ум с давних времен пытался постичь природу молний и грома, понять их естественные причины. В древние века над этим размышлял Аристотель. Над природой молний задумывался Лукреций. Весьма наивно представляются его попытки объяснить гром как следствие того, что «тучи сшибаются там под натиском ветров».

Многие столетия, включая и средние века, считалось, что молния – это огненный пар, зажатый в водяных парах туч. Расширяясь, он прорывает их в наиболее слабом месте и быстро устремляется в низ, к поверхности земли.

В 1752 г Бенджамин Франклин экспериментально доказал, что молния – это сильный электрический разряд. Ученый выполнил знаменитый опыт с воздушным змеем, который был запущен в воздух при приближении грозы.

**Опыт:** *На крестовине змея была укреплена заостренная проволочка, к концу веревки привязаны ключ и шелковая лента, которую он удерживал рукой. Как только грозовая туча оказалась над змеем, заостренная проволока стала извлекать из нее электрический заряд, и змей вместе с бечевой наэлектризуется. После того, как дождь смочит змея вместе с бечевкой, сделав их тем самым свободными проводить электрический заряд, можно наблюдать как электрический заряд будет «стекать» при приближении пальца.*

Одновременно с Франклиным исследованием электрической природы молнии занимались М.В. Ломоносов и Г.В.Рихман.

Благодаря их исследованиям в середине 18 века была доказана электрическая природа молнии. С этого времени стало ясно, что молния представляет собой мощный электрический разряд, возникающий при достаточно сильной электризации туч.

**6. Молнии.**

* 1. **Виды молний**

1. Большинство молний возникает между тучей и земной поверхностью, однако, есть молнии, возникающие между тучами. Все эти молнии принято называть **линейными**. Длина отдельной линейной молнии может измеряться километрами. (Линейную молнию можно получить искусственно – скользящий разряд.)
2. Еще одним видом молний является ленточная молния. При этом следующая картина, как если бы возникли несколько почти одинаковых линейных молний, сдвинутых относительно друг друга.
3. Было замечено, что в некоторых случаях вспышка молний распадается на отдельные святящиеся участки длиной в несколько десятков метров. Это явление получило название **четочной молнии**. Согласно Малану (1961) такой вид молний объясняется на основе затяжного разряда, после свечения которого казалось бы более ярким в том месте, где канал изгибается в направлении наблюдателя, наблюдающего его концом к себе. А Юман (1962) считал, что это явление стоит рассматривать как пример «пинг-эффекта», который заключается в периодическом изменении радиуса разрядного столба с периодом в несколько микросекунд.
   1. **Физика линейной молнии**

Линейная молния представля6т собой несколько импульсов, быстро следующих друг за другом. Каждый импульс – это пробой воздушного промежутка между тучей и землей, происходящий в виде искрового разряда. В начале рассмотрим первый импульс. В его развитии есть две стадии: сначала образуется канал разряда между тучей и землей, а затем по образовавшемуся каналу быстро проходит импульс основного тока.

**Первая стадия** (образование канала разряда) показана на рис 3. Все начинается с того, что в нижней части тучи формируется электрическое поле очень большой напряженности – 105…106 В/м.

Свободные электроны получают в таком поле огромные ускорения. Эти ускорения направлены вниз, поскольку нижняя часть тучи заряжена отрицательно, а поверхность земли положительно. На пути от первого столкновения до другого, электроны приобретают значительную кинетическую энергию. Поэтому, сталкиваясь с атомами или молекулами, они ионизируют их. В результате рождаются новые (вторичные) электроны, которые, в свою очередь, ускоряются в поле тучи и затем в столкновениях ионизуют новые атомы и молекулы. Возникают целы лавины быстрых электронов, образующие у самого «дна» тучи, плазменные «нити» – стример.

Сливаясь друг с другом, стримеры дают начало плазменному каналу, по которому в последствии пройдет импульс основного тока

(рис 3). Этот развивающийся от «дна» тучи к поверхности земли плазменный канал наполнен свободными электронами и ионами, и поэтому может хорошо проводить электрический ток. Его называют **лидером** или точнее **ступенчатым лидером**. Дело в том, что канал формируется не плавно, а скачками – «ступенями».

Почему в движении лидера наступают паузы и притом относительно регулярные – точно неизвестно. Существует несколько теорий ступенчатых лидеров.

В 1938 году Шонланд выдвинул два возможнх объяснения задержки, которая вызывает ступенчатый характер лидера. Согласно одному из них, должно происходить движение электронов выиз по каналу **ведущего стримера** (**пилота**). Однако часть электронов захватывается атомами и положительно заряженными ионами, так что требуется некоторое время для поступления новых продвигающихся электронов, прежде чем возникнет градиент потенциала, достаточный для того, чтобы ток продолжался. Согласно другой точке зрения, время требуется для того, чтобы положительно заряженные ионы скопились под головкой канала лидера и, таким образом, создали на ней достаточный градиент потенциала. В 1944 году Брюс предложил иное объяснение, в основе которого лежит перерастание тлеющего разряда в дуговой. Он рассмотрел «коронный разряд», аналогичный разряду острия, существующий вокруг канала лидера не только на головке канала, но и по всей его длине. Он дал объаснение тому, что условия для существования дугового разряда будут устанавливаться на некоторок время после того, как канал разовьется на определенное расстояние и, следовательно возникнут ступени. Это явление еще до конца не изучено и конкретной теории пока нет. А вот физические процессы, происходящие вблизи головки лидера, вполне понятны. Напряженность поля под тучей достаточно велика – она составляетB/м; в области пространства непосредственно перед головкой лидера она еще больше. Увеличение напряженности поля в этой области хорошо объясняет рис.4, где штриховыми кривыми показаны сечения эквипотенциальных поверхностей, а сплошными кривыми – лини напряженности поля. В сильном электрическом поле вблизи головки лидера происходит интенсивная ионизация атомов и молекул воздуха. Она происходит за счет, во-первых, бомбардировки атомов и молекул быстрыми электронами, вылетающими из лидера (так называемая **ударная ионизация**), и, во-вторых, поглощение атомами и молекулами фотонов ультрафиолетового излучения, испускаемого лидером (фотоионизация). Вследствие интенсивной ионизации встречающихся на пути лидера атомов и молекул воздуха плазменный канал растет, лидер движется к проверхности земли.



С учетом остановок по пути лидеру, чтобы достигнуть земли, потребовалось 10…20 мс при расстоянии 1 км между тучей и земной поверхностью (рис 3в). Теперь тучу соединяет с землей плазменный канал, прекрасно проводящий ток. Канал ионизированного газа как бы замкнул тучу с землей накоротко. На этом первая стадия развития начального импульса заканчивается.

**Вторая стадия** протекает быстро и мощно. По проложенному лидером пути устремляется основной ток (рис 3г). Импульс тока длится примерно 0,1мс. Сила тока достигает значений порядка А. Выделяется значительное количество энергии (до Дж). Температура газа в канале достигает . Именно в этот момент рождается тот необычайно яркий свет, который мы наблюдаем при разряде молнии, и возникает гром, вызванный внезапным расширением внезапно нагретого газа.



Существенно, что и свечение, и разогрев плазменного канала развиваются в направлении от земли к туче, т.е. **снизу вверх**. Для объяснения этого явления разобьем условно весь канал на несколько частей. Как только канал образовался (головка лидера достигла земли), вниз соскакивают прежде всего электроны, которые находились в самой нижней его части; поэтому нижняя часть канала первой начинает светиться и разогреваться. Затем к земле устремляются электроны из следующей (более высоко находящейся части канала); начинаются свечение и разогрев этой части. И так постепенно – от низа до верха – в движение к земле включаются все новые и новые электроны; в результате свечение и разогрев канала распространяются в направлении снизу вверх.

После того, как прошел импульс основного тока, наступает пауза длительностью от 10 до 50мс. За это время канал практически гаснет, его температура падает примерно до , степень ионизации канала существенно уменьшается.



Однако в туче еще сохранился большой заряд, поэтому новый лидер устремляется из тучи к земле, готовя дорогу для нового импульса тока. Лидеры второго и последующих ударов являются не ступенчатыми, а **стреловидными**. Стреловидные лидеры аналогичны ступеням ступенчатого лидера. Однако поскольку ионизированный канал уже существует, необходимость в пилоте и ступенях отпадает. Так как ионизация в канале стреловидного лидера «старше», чем у ступенчатого лидера, рекомбинация и диффузия у носителей носителей заряда происходят интенсивнее, а поэтому и степень ионизации в канале стреловидного лидера ниже. В результате скорость стреловидного лидера меньше скорости отдельных ступеней ступенчатого лидера, но больше скорости пилота. Значения скорости стреловидного лидера составляют от до м/с.



Если между последующими ударами молнии пройдет больше времени, чем обычно, то степень ионизации может быть настолько низкой, особенно в нижней части канала, что возникает необходимость в новом пилоте для повторной ионизации воздуха. Это объясняет отдельные случаи образования ступеней на нижних концах лидеров, предшествующих не первому, а последующим главным ударам молнии.

Как говорилось выше, новый лидер идет по пути, который был проторен начальным лидером. Он без остановки (1мс) пробегает весь путь сверху до низу. И снова следует мощный импульс основного тока. После очередной паузы все повторяется. В итоге высвечиваются несколько мощных импульсов, которые мы естественно, воспринимаем как единый разряд молнии, как единую яркую вспышку.

**7. Загадка шаровой молнии.**

Шаровая молния абсолютно не похожа на обычную (линейную) молнию ни по своему виду, ни по тому, как она себя ведет. Обычная молния кратковременна; шаровая живет десятки секунд, минуты. Обычная молния сопровождается громом; шаровая совсем почти бесшумна, в поведении ее много непредсказуемого.

Шаровая молния задает нам множество загадок, вопросов, на которые нет ясного ответа. В настоящее время можно лишь предполагать, делать гипотеза.

Единственным методом изучения шаровой молнии является систематизация и анализ случайных наблюдений.

**7.1. Итоги обработки наблюдений.**

Сформируем основные выводы, которые можно сделать из анализа наблюдений.

Плотность вещества шаровой молнии практически совпадает с плотностью воздуха и обычно лишь немногим превосходит ее, т.е. она составляет вероятно около . Недаром шаровая молния стремится опустится вниз, разницу между силой тяжести и выталкивающей (архимедовой) силой компенсируют конвекционные воздушные потоки, а также сила, с какой действуют на молнию атмосферное электрическое поле.



Число шаровых молний , распавшихся за время , определяется следующим выражением:



где ; ; ; - число молний в момент . Доли короткоживущих () и долгоживущих () молний меняются в различных статистических выборках. Для наших данных они приблизительно одинаковы ( ).



Наиболее вероятный диаметр шаровой молнии равен 10-15 см, а средний диаметр 20-30 см. Распределение размеров шаровой молнии описывается формулой, включающей один характерный размер :



где - плотность вероятности наблюдения шаровой молнии диаметром ; = 11 см для наших данных.



Температура шаровой молнии (не считая момента «взрыва») лишь относительно ненамного превышает температуру окружающего воздуха, достигая, по-видимому, всего нескольких сотен градусов (предположительно 500-600 К).



Вещество шаровой молнии является проводником с низкой работой выхода зарядов и поэтому обладает свойством легко рассеивать электрические заряды, накопившиеся в других проводниках.



Контакт шаровой молнии с заряженными проводниками приводит к появлению кратковременных импульсов электрического тока, довольно значительных по силе и проявляющихся иногда на сравнительно большом расстоянии от места контакта. Это вызывает перегорание предохранителей, срабатывание реле, вывод из строя электроприборов и другие аналогичные явления. Электрические заряда стекают со значительной площади через вещество шаровой молнии и рассеиваются в атмосфере.

Взрыв шаровой молнии во многих (не исключено, чти почти во всех) случаях является следствием такого кратковременного электрического разряда. Поражения шаровой молнией людей и животных также, по-видимому, связаны с импульсами тока, которые она вызывает.

Запас энергии шаровой молнии может составлять от нескольких килоджоулей до нескольких десятков килоджоулей, в некоторых случаях (особенно при больших размерах молнии), возможно, до ста килоджоулей. Плотность энергии 1-10 . Однако эффекты взрыва могут определятся, по крайней мере в некоторых случаях, не энергией самой шаровой молнии, а энергией, накопленной во время гроза в заряженных проводниках и окружающих их электрических полях. Шаровая молния играет в этом случае роль триггерного механизма, включающего процесс освобождения этой энергии.



Вещество шаровой молнии образует обособленную фазу в воздухе, обладающую значительной поверхностной энергией . На существование поверхностного натяжения указывают стабильность границы шаровой молнии, в том числе при перемещении ее в окружающем воздухе (иногда при сильном ветре), устойчивость сферической формы и восстановление ее после деформаций, возникающих от взаимодействия с окружающими телами. Необходимо отметить, что сферическая форма молнии восстанавливается и после больших деформаций, сопровождающихся распадом шаровой молнии на части.



Кроме того, на поверхности шаровой молнии нередко наблюдаются поверхностные волны. При достаточно большой амплитуде эти волны приводят к выбрасыванию капель вещества с поверхности, аналогичных брызгам жидкости.

Существование шаровой молнии не сферической формы: грушевидная, эллиптическая могут быть обусловлены поляризацией в сильных магнитных полях

Шаровая молния может нести электрический заряд, который появляется, например, при поляризации в электрическом поле (особенно если заряды разных знаков по-разному стекают с ее поверхности). Движение шаровой молнии в условиях безразличного равновесия, при котором сила тяжести уравновешена архимедовой силой, определяется как электрическими полями, так и движением воздуха.



Наблюдается корреляция времени жизни и размера молнии.



Долгоживущие молнии () оказываются в основном больших размеров (по данным они составляют 80% среди молний диаметром больше 30 см и только 20% среди молний диаметром меньше 10 см). Наоборот, короткоживущие молнии () имеют малый диаметр (80% молний диаметром меньше 10 см и 20% - больше 30 см).



Анализируя наблюдения, можно предположить, что шаровая молния появляется там, где накапливается значительный электрический заряд, при мощной, но кратковременной эмиссии этого заряда в воздух.



Исчезает шаровая молния в результате взрыва, развития неустойчивостей или из-за постепенного расходования запаса ее энергии и вещества (тихое погасание). Природа взрыва щаровой молнии не вполне ясна.



Большая часть молний – около 60% - испускает видимый свет, относящийся к красному концу спектра (красный, оранжевый или желтый). Около 15% испускает свет в коротковолновой части спектра (голубой, реже – синий, фиолетовый, зеленый). Наконец, приблизительно в 25% случаев молния имеет белый цвет. Мощность излучаемого света -



порядка нескольких ватт. Поскольку температура молнии невелика, ее видимое излучение имеет неравновесную природу. Возможно, молния излучает также некоторое количество ультрафиолетового излучения, поглощением которого в воздухе можно объяснить голубой ореол вокруг нее.

Теплообмен шаровой молнии с окружающей средой происходит через испускание значительного количества инфракрасного излучения. Если шаровой молнии действительно можно приписать температуру 500-600 К, то мощность равновесного теплового излучения, испускаемого молнией среднего диаметра (см), порядка 0,5-1 кВт и максимум излучения лежит в области длин волн 5-10 мкм.



Кроме инфракрасного и видимого излучений шаровая молния может испускать довольно сильное неравновесное радиоизлучение.



7.2. Гипотезы.

Все гипотезы, касающиеся физической природы шаровой молнии можно разделить на две группы. В одну группу входят гипотезы, согласно которым шаровая молния непрерывно **получает энергию извне**. Предполагается, что молния каким-то образом получает энергию, накапливающуюся в облаках и тучах, причем тепловыделение в самом канале оказывается незначительным, так что вся передаваемая энергия сосредотачивается в объеме шаровой молнии, вызывая его свечение. К другой группе относятся гипотезы, согласно которым шаровая молния становится **самостоятельно существующим объектом**. Этот объект состоит из некоего вещества, внутри которого происходят процессы, приводящие к выделению энергии.

Среди гипотез первой группы отметим гипотезу, предложенную в 1965 году академиком **Капицей**. Он подсчитал, что собственных запасов энергии шаровой молнии должно хватить на ее существование в течение сотых долей секунды. В природе, как известно, она существует гораздо дольше и нередко заканчивает свое существование взрывом. Возникает вопрос, откуда энергия?

Поиск решения привел Капицу к выводу, что «если в природе не существует источников энергии, еще нам неизвестных, то на основании закона сохранения энергии приходится принять, что во время свечения к шаровой молнии непрерывно подводится энергия, и мы вынуждены искать источник вне объема шаровой молнии». Академик теоретически показал, что шаровая молния представляет собой высокотемпературную плазму, существующую довольно длительное время за счет резонансного поглощения или интенсивного поступления энергии в виде радиоволнового излучения.

Он высказал мысль, что искусственная шаровая молния может быть создана с помощью мощного потока радиоволн, сфокусированного в ограниченную область пространства (Если молния – шар диаметром порядка 35-70 см.)

; где - длина волны, - радиус шаровой молнии.



Но несмотря на многие привлекательные стороны данной гипотезы, она все же представляется несостоятельной: не объясняет характера перемещения шаровой молнии, зависимости ее поведения от воздушных потоков; в рамках данной гипотезы трудно объяснить хорошо наблюдаемую четкую поверхность молнии; взрыв такой шаровой молнии не должен сопровождаться выделением энергии и напоминает громкий хлопок.

Несколько лет назад в одной из лабораторий НИИ механики МГУ под руководством А.М. Хазена была создана еще одна теория огненного шара.

Согласно ей, в грозу под действием разности потенциалов начинается направленный дрейф электронов из облаков к земле. Попутно электроны, разумеется, сталкиваются с молекулами газов, из которых состоит воздух, причем вопреки здравому смыслу – тем реже, чем выше скорость электрона. В итоге отдельные атомы, достигшие некоей критической скорости, скатываются вниз, будто с горки. Такой «эффект горки» перестраивает войско заряженных частиц. Они начинают скатываться не беспорядочной толпой, а шеренгами, подобно тому, как накатываются волны морского прибоя. Только «прибой» этот обладает колоссальной скоростью – 1000 км/с! Энергии таких волн, как показывают расчеты Хазена, вполне достаточно, чтобы, настигая плазменный шар, подпитывать его своим электростатическим полем и некоторое время поддерживать в нем электромагнитные колебания. Теория Хазена ответила на некоторые вопросы: почему шаровая молния часто движется над землей, будто копируя рельеф местности? Объяснение следующее: с одной стороны, светящаяся сфера, обладая более высокой температурой по отношению к окружающей среде, стремится выплыть наверх под действием архимедовой силы; с другой стороны, под действием электростатических сил шар притягивается к влажной проводящей поверхности почвы. На какой-то высоте обе силы уравновешивают друг друга и шар словно катится по невидимым рельсам.

Иногда, правда, шаровая молния делает и резкие скачки. Их причиной может послужить либо сильный порыв ветра, либо изменение в направлении движения электронной лавины.

Нашлось объяснение и еще одному факту: шаровая молния стремится попасть внутрь построек. Любое строение, особенно каменное, поднимает в данном месте уровень грунтовых вод, а значит, возрастает электропроводность почвы, что и привлекает плазменный шар.

И наконец, почему шаровая молния по-разному заканчивает свое существование, иногда бесшумно, а чаще – взрывом? Здесь тоже виноват электронный дрейф. Если к шаровому «сосуду» подводится слишком много энергии, он в конце концов лопается от перегрева или, попав в область повышенной электропроводности разряжается, подобно обычной линейной молнии. Если же электронный дрейф по каким-либо причинам затухает, шаровая молния тихо угасает, рассеивая свой заряд в окружающем пространстве.

А.М. Хазен создам интересную теорию одного из самых загадочных явлений природы и предложил схему ее создания: «Возьмем проводник, проходящий через центр антенны передатчика сверхвысоких частот (СВЧ). Вдоль проводника, как по волноводу, будет распространятся электромагнитная волна. Причем проводник надо взять достаточно длинный, чтобы антенна электростатически не влияла на свободный конец. Подключим этот проводник к импульсному генератору высокого напряжения и, включив генератор, подадим на него короткий импульс напряжения, достаточный для того, чтобы на свободном конце мог возникнуть коронный разряд. Импульс надо сформировать так, чтобы возле его заднего фронта напряжение на проводнике не падало до нуля, а сохранялось на каком-то уровне, недостаточном для создания короны, то есть постоянно светящегося заряда на проводнике. Если менять амплитуду и время импульса постоянного напряжения, варьировать частоту т амплитуду поля СВЧ, то в конце концов на свободном конце провода даже после выключения переменного поля должен остаться и, возможно, отделиться от проводника светящийся плазменный сгусток».

Необходимость большого количества энергии мешает реализовать данный эксперимент.

И все же большинство ученых отдают предпочтение гипотезам второй группы.

Одна из них предполагает **химическую природу** шаровой молнии. Первым ее предложил Доминик Араго. А в середине 70-х годов ее детально разрабатывал Б.М.Смирнов. Предполагается, что шаровая молния состоит из обычного воздуха (имеющего температуру примерно на 100˚ выше температуры окружающей атмосферы), небольшой примеси озона и оксидов азота и . Принципиально важную роль здесь играет озон, образующийся при разряде обычной молнии; его концентрация около 3%. Внутри шаровой молнии происходят химические реакции:



Они сопровождаются выделением энергии. При этом в объеме диаметром 20 см выделяется примерно 1 кДж энергии. Это мало, согласно подсчетам, запас энергии шаровой молнии таких размеров должен составлять примерно 1000 кДж. Недостатком рассматриваемой физической модели является также невозможность объяснения устойчивой формы шаровой молнии, существование поверхностного натяжения.

В поисках ответа была разработана новая **физическая теория**. Согласно этой гипотезы шаровая молния состоит из положительных и отрицательных ионов. Ионы образуются за счет энергии разряда обычной линейной молнии. Затраченная на их образование энергия и определяет запас энергии шаровой молнии. Она высвобождается при рекомбинации ионов. Благодаря электростатическим (кулоновским) силам, действующим между ионами, объем, заполненный ионами, будет обладать поверхностным натяжением, что и определяет устойчивую шаровую форму молнии.

***Рассмотрим задачу:***

*Ионы заполняют объем сферы радиусом r=10 см, плотность ионного газа Оценить энергию, запасенную в таком объеме, если энергия ионизации*



***Решение:*** *в единице рассматриваемого объема запасена энергия Умножив ее на объем шара находим искомую энергию.*



*Подсчитав числовые значения получим .*



*Эта энергия вполне согласуется со сделанными ранее оценками энергии шаровой молнии соответствующих размеров. В задаче была выбрана плотность ионного газа порядка , примерно такова плотность воздуха в условиях, близких к нормальным.*



У рассматриваемой модели шаровой молнии есть одно уязвимое место. Дело в том, что если положительные и отрицательные ионы будут «перемешаны» по объему молнии, то они будут очень быстро рекомбинировать – за время порядка всего Следовательно, такая шаровая молния не может существовать в течение секунды, ин говоря уж о минутах. Таким образом необходимо существенно затормозить (задержать) процесс рекомбинации ионов. Как это сделать?



Ответ **дает кластерная** гипотеза, предложенная в 1976 году И.П.Стахановым. Стаханов, как и многие другие физики исходил из того, что молния состоит из вещества, находящегося в состоянии плазмы. Плазма похожа на газообразное состояние с единственной разницей: молекулы вещества в плазме ионизированы, то есть потеряли (или наоборот приобрели лишние) электроны и перестали быть нейтральными. Это значит, что молекулы могут взаимодействовать не только как частицы газа – при столкновениях, но и на расстоянии с помощью электрических сил.

Разноименно заряженные частицы притягиваются. Поэтому в плазме молекулы стремятся вернуть себе потерянный заряд путем рекомбинации с оторванными электронами. Но после рекомбинации плазма превратится в обычный газ. Поддерживать жизнь плазмы можно только до тех пор, пока рекомбинации что-то мешает, - как правило, очень высокая температура.

Если шаровая молния – это плазменный шар, то она обязана быть горячей. Так рассуждали сторонники плазменных моделей до Стаханова. А он заметил, что существует и другая возможность. Ионы, то есть молекулы, потерявшие или захватившие лишний электрон, могут притянуть к себе обыкновенные нейтральные молекулы воды и окружить себя прочной «водяной» оболочкой, запирающей лишние электроны внутри и не дающий им воссоединятся со своими хозяевами. Такое возможно потому, что молекула воды имеет два полюса: отрицательный и положительный, за один из которых «хватается» ион в зависимости от своего заряда, чтобы притянуть молекулу к себе. Таким образом, сверхвысокие температуры больше не нужны, плазма может оставаться и «холодной», не горячее 200-300 градусов. Ион, окруженный водяной оболочкой, называется кластером, поэтому гипотеза профессора Стаханова получила имя кластерной.

Самым важным достоинством кластерной гипотезы стало то, что она продолжает не просто жить в науке, но и обогащаться новым содержанием. Группа исследователей из Института общей физики РАН, в которую входит профессор Сергей Яковленко, недавно получила поразительные новые результаты.

Выяснилось, что сама по себе водяная оболочка не может получиться столь плотной, чтобы помешать ионам рекомбинировать. Но рекомбинация приводит к возрастанию энтропии шаровой молнии, то есть меры ее беспорядка. Действительно, в плазме положительно и отрицательно заряженные молекулы отличаются друг от друга, по-особому взаимодействуют, а после рекомбинации они перемешиваются и становятся неразличимыми. До сих пор считалось, что в предоставленной самой себе системе беспорядок самопроизвольно возрастает, то есть в случае шаровой молнии рекомбинация произойдет сама собой, если ей как-то не помешать. Из результатов компьютерного моделирования и теоретических выкладок, проведенных в институте общей физики, следует совершенно иной вывод: беспорядок вносится в систему извне, например при хаотичных столкновениях молекул на границе шаровой молнии и воздуха, в котором она движется. Пока беспорядок не «накопится», рекомбинации не будет, даже несмотря на то, что молекулы стремятся к этому. Характер их движения внутри шаровой молнии таков, что при сближении разноименно заряженные молекулы будут пролетать друг мимо друга, не успевая обменяться зарядом.

Итак, согласно кластерной гипотезе шаровая молния представляет собой самостоятельно существующее тело (без непрерывного подвода энергии от внешних источников), состоящих из тяжелых положительных и отрицательных ионов, рекомбинация которых сильно заторможена вследствие гидратации ионов.

В отличие от многих других гипотез, данная выдерживает сравнение с результатами нескольких тысяч известных сейчас наблюдений и удовлетворительно объясняет многие из них.

Число различных гипотез о природе шаровой молнии значительно превосходит сотню, но мы разобрали только несколько. Ни одна из существующих в настоящее время гипотез не является совершенной, каждая имеет множество недостатков.

Поэтому, хотя принципиальные закономерности природы шаровой молнии проняты, данную проблему нельзя считать решенной – осталось множество тайн и загадок, а также нет конкретных способов создания ее в лабораторных условиях.

### СЕВМАШВТУЗ

Кафедра физики

#### Курсовая работа

**Молния – газовый разряд в природных условиях**

**по дисциплине «Общая физика»**

**студент Охлупина А.М.**

**группа №426**

**руководитель Горобец А.Г.**

г. Северодвинск

2000 г.