

03:04

©1995 г.

## О ПРИРОДЕ ЧЕТОЧНОЙ МОЛНИИ

*Г.К.Тумакаев*

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,  
194021, Санкт-Петербург, Россия  
(Поступило в Редакцию 3 июня 1994 г.)

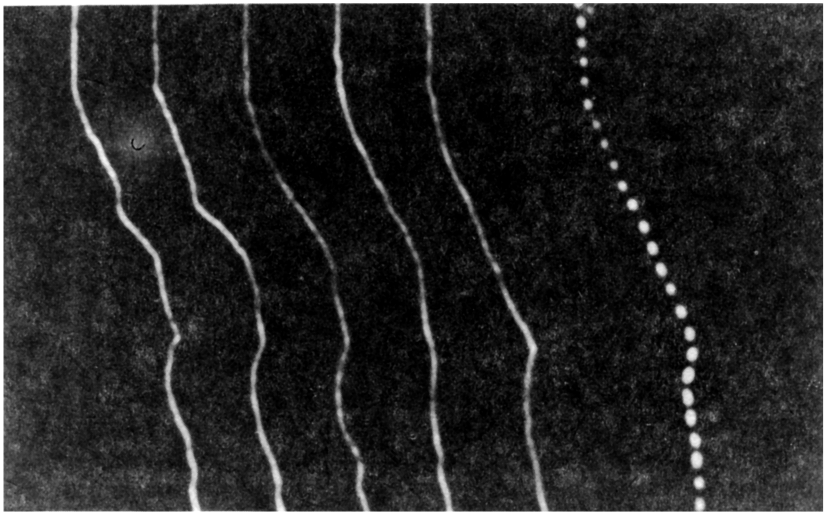
Высказывается предположение, что природа четочной молнии связана с процессом стратификации канала линейной молнии. Эта версия апробируется экспериментальным наблюдением фрагментации контрагированного положительного столба высоковольтного разряда в аргоне с присадками молекулярных газов при атмосферном давлении.

Феномен четочной молнии [1], так же как и шаровой [1-3], относится к до конца непонятым в настоящее время формам проявления атмосферного электричества. Не вдаваясь в детальный анализ реальных, сомнительных и безусловно ошибочных наблюдений четочной молнии, укажем, что суть их заключается в регистрации необычной метаморфозы главного канала линейной молнии — распада его на отдельные, обособленные друг от друга фрагменты шаровой или удлинённой (бочкообразной) формы.

В качестве иллюстрации такой метаморфозы на рис. 1 приведена фотография [1] шести последовательных разрядов молнии, последний из которых принял четочную форму. Другой пример трансформации главного канала в четочную молнию представлен на рис. 2 [3].

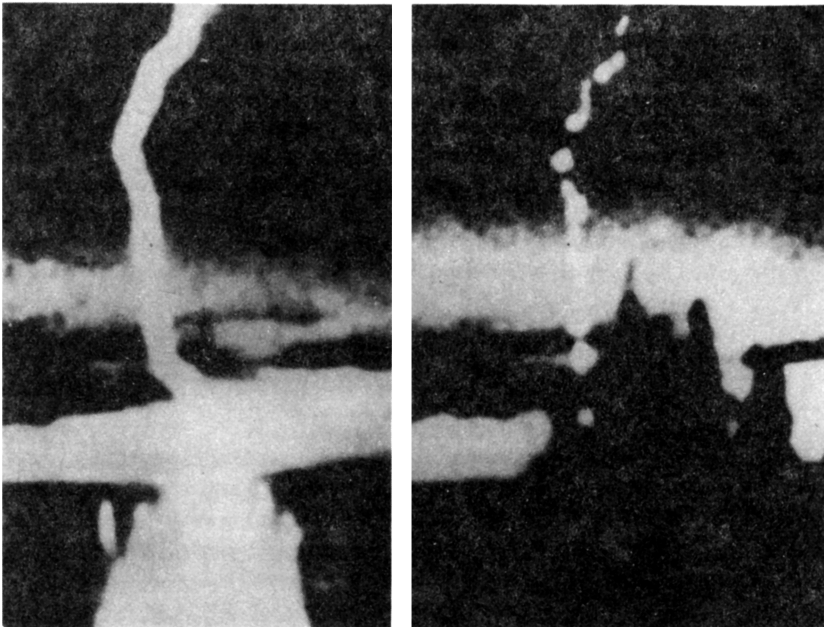
Из-за фактора случайности наблюдения редкого явления природы информация о четочной молнии весьма ограничена. К сожалению, не восполняется этот пробел и единичными наблюдениями фрагментации токового канала в воздухе при атмосферном давлении в опытах со стимулированными молниями [1] и при экспериментальных исследованиях высоковольтных импульсных разрядов [1,4]. Кроме констатации факта существования феномена имеющиеся данные дают представление о времени жизни четочной молнии, которое не превышает 1–2 с и позволяют предположить, что развитие процесса фрагментации совпадает с периодом затухания основного разряда молнии.

Для объяснения природы образования четочной молнии, которая до настоящего времени остается неясной [1,2,5], обратимся к хорошо



**Рис. 1.** Многоразовый разряд линейной молнии, последний из которых принял четочную форму.

известным в физике газового разряда процессам фрагментации положительного столба разряда [6-9] при высоких (более  $10^3-10^4$  А/см<sup>2</sup>) плотностях тока за счет пинч-эффекта и малых плотностях тока (порядка  $10^{-3}$  А/см<sup>2</sup>), соответствующих режиму контракции тлеющего разряда за счет его стратификации.



**Рис. 2.** Трансформация главного канала стимулированной взрывом глубинной бомбы молнии в четочную форму.

Самосжатие положительного столба разряда за счет пинч-эффекта реализуется при условии, когда магнитное давление токового слоя превышает или оказывается соизмеримым с газодинамическим давлением плазмы, а контракция положительного столба тлеющего разряда, в частности, из-за перегревных процессов [7], когда джоулев нагрев плазмы перестает компенсироваться отводом тепла за счет теплопроводности [6]. Естественно, эти условия в зависимости от давления, а для контракции и от сорта газа выполняются при вполне определенных плотностях тока. На рис. 3 для широкого диапазона изменения плотностей тока и давления газа кривыми 1 и 2 нанесены расчетные данные [6], определяющие нижнюю границу возникновения контракции и самосжатия положительного столба разряда в парах ртути. Здесь же представлены экспериментальные данные, устанавливающие область контракции положительного столба тлеющего разряда, стабилизированного стенками разрядной трубки диаметром 2 см в аргоне [10], неоне [11] и азоте [12]. Условия контракции разряда, стабилизированного электродами, рассмотрены в [9].

Фрагментация главного канала линейной молнии, или образование четочной молнии за счет пинч-эффекта даже во время протекания максимальных токов, — явление маловероятное. Согласно данным, приведенным на рис. 3, пинчевание при атмосферном давлении во всех газах, в том числе и в воздухе, реализуется при плотностях тока не ниже  $10^4$  А/см<sup>2</sup>. Для линейной молнии это условие оказывается достаточно жестким и, более того, практически невыполнимым. Действительно, даже для наиболее интенсивных из них с амплитудой тока до 230 кА

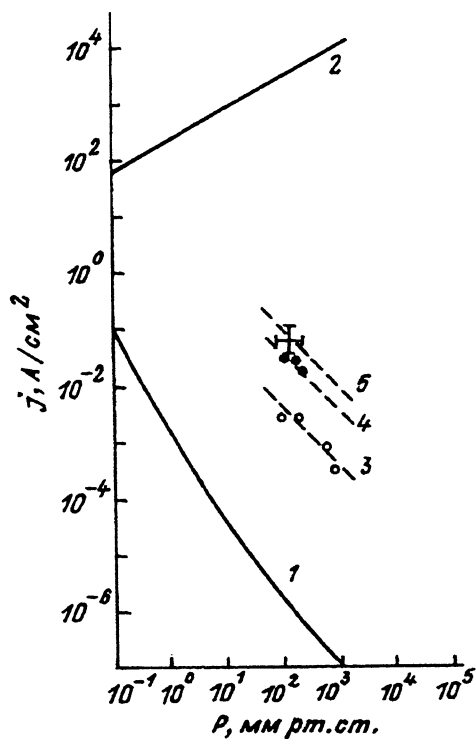


Рис. 3. Режим контракции и самосжатия положительного столба разряда (ртуть (расчет) (1,2), аргон (3), неон (4), азот (5)).

и диаметром токового канала 6–25 см <sup>[9,13]</sup> плотность тока по оценке сверху не превышает величины  $0.8 \cdot 10^4$  А/см<sup>2</sup>. Аналогичный вывод сформулирован и в [1]. Несостоятельность версии об определяющей роли пинч-эффекта также следует из несопоставимости времени жизни четочной молнии (до 0.5 с по [9] и до 1–2 с по [13]) с длительностью импульса тока молнии, определяемого на уровне 0.5 от его максимального значения, изменяющегося в пределах от 10 до 120 мкс <sup>[9,13]</sup>.

Предположение о стратификационной природе четочной молнии в отличие от предыдущего вполне реалистично и, что очень важно, справедливость его экспериментально доказуема.

Для обоснования этого предположения, во-первых, конкретизируем на основании данных <sup>[10–12]</sup> условия образования страт в положительном столбе разряда при атмосферном давлении: во-вторых, покажем очевидность реализации этих условий на отдельных этапах развития линейной молнии, наконец, в-третьих, приведем результаты экспериментального наблюдения фрагментального расслоения высоковольтного разряда при атмосферном давлении.

В инертных газах при давлении в несколько десятков Тор образование страт в тлеющем стабилизированном стенками разряде — явление легко наблюдаемое [7]. В отличие от тлеющего разряда сведения о стратификации положительного столба контрагированного разряда в настоящее время весьма ограничены. Тем не менее такого рода фрагментации наблюдались при давлениях до 200 Тор как в инертных, так и в молекулярных газах <sup>[14,15]</sup>. В <sup>[15]</sup>, кроме того, отмечен факт наблюдения периодического расслоения контрагированного канала высоковольтной дуги при атмосферном давлении диффузными перемычками.

Отметим, что поскольку стратификация и контракция токового канала — два взаимосвязанных процесса, то условия реализации последнего, а это экспериментально легко прослеживается <sup>[16]</sup>, могут служить надежным ориентиром для практического определения режима стратификации разряда при атмосферном давлении. Согласно данным, приведенным на рис. 3, контракция тлеющего разряда при атмосферном давлении в аргоне, неоне и азоте соответственно имеет место при плотностях тока порядка  $3 \cdot 10^{-4}$ ,  $3 \cdot 10^{-3}$  и  $7 \cdot 10^{-3}$  А/см<sup>2</sup> или при разрядном токе (в трубке диаметром 2 см) порядка 1,10, 20 мА. Эти значения можно рассматривать в качестве нижнего предела возможной стратификации дугового канала и верхнего предела для образования страт в тлеющем разряде.

В процессе развития линейной молнии условия перехода тлеющего разряда к дуговому практически могут реализоваться дважды. Во-первых, при возрастании тока до 1 А в начальной стадии эволюции молнии. В этом случае длительное существование слаботочного разряда возможно лишь при замораживании развития молнии на лидерном этапе. Во-вторых, на завершающей стадии существования главного канала линейной молнии, когда после мощного, но кратковременного импульса тока устанавливается продолжительный во времени (до 1.5 с) режим протекания небольших токов <sup>[13]</sup>. При сохранении целостности разрядного канала до токов порядка 0.1–1 А, а это не представляется противоестественным, в развитии линейной молнии неизбежно должны реализоваться необходимые условия для перехода контрагированного разряда в тлеющий и достаточные для его фрагментации.

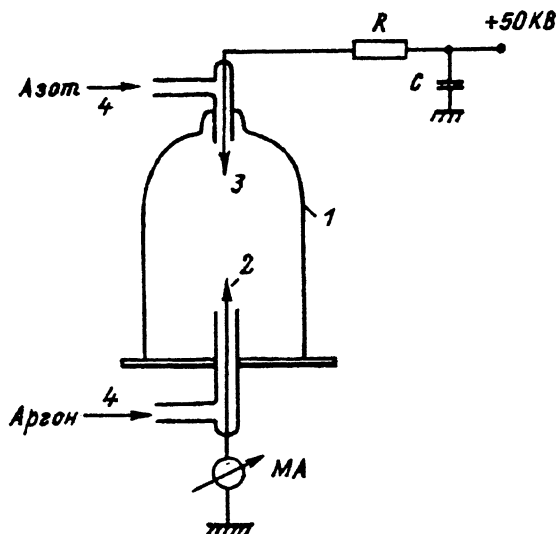


Рис. 4. Схема экспериментальной установки.

1 — Стеклоный колокол, 2 — катод, 3 — анод, 4 — штуцер для напуска газа.

Для экспериментальной апробации предположения о стратификационной природе четочной молнии в лабораторных условиях был воспроизведен процесс образования страт в неограниченном стенками стационарном высоковольтном дуговом разряде в аргоне при атмосферном давлении.

Схема экспериментальной установки приведена на рис. 4. Стационарный дуговой разряд в атмосфере аргона или неомогенной смеси аргона с азотом или углекислым газом осуществлялся между двумя заостренными электродами, изготовленными из стальной проволоки диаметром 2 мм, внутри стеклянного колокола диаметром 30 см и высотой 50 см. Величина межэлектродного промежутка варьировалась от 10 до 30 см. Расположение электродов вертикальное. Катод располагался в нижней, а анод — в верхней части колокола. Для пространственной стабилизации разряда в приэлектродных областях в работе использовались электроды с остеклованной боковой поверхностью. Напуск аргона в систему производился через штуцер, закрепленный на основании конструкции, а примесных газов — через штуцер на вершине колокола. Неомогенная смесь создавалась обычным вытеснением одного газа другим.

В качестве источника высокого напряжения использован рентгеновский трансформатор. Выпрямитель собран на кенотронах. Во внешнюю электрическую цепь включены емкостной фильтр  $C \sim 0.1$  мкф и балластное сопротивление  $R \sim 1$  Мом. Плавная регулировка разрядного тока при  $U = \text{const}$  осуществлялась путем изменения накала катодов кенотронов.

Рабочий режим исследования фрагментации положительного столба разряда: разность потенциалов на клеммах выпрямителя 50–60 кВ, сила тока в цепи 10–30 мА.

Свечение положительного столба разряда фотографировалось с расстояния 0.5 м на пленке чувствительностью 65 ед. ГОСТа с экспозицией 1/30 с.

На рис. 5 представлен ряд фотографий стационарного высоковольтного разряда при атмосферном давлении в межэлектродном промежутке протяженностью 15 см (снимки, исключая ближайшую прианодную область, охватывают 90 % разрядного промежутка). Рис. 5, 1-6 последовательно показана эволюция структуры разряда в аргоне при уменьшении силы тока в электрической цепи от 30 до 10 мА, а рис. 5, 7-10 при увеличении содержания молекулярных газов в аргоне.

Первые признаки разрушения контракции высоковольтного разряда в аргоне отмечаются при величине разрядного тока порядка 30 мА. Отметим, что это значение находится в достаточно хорошем согласии с ранее приведенными данными о границе перехода тлеющего разряда в контрагированный. При  $I \approx 30$  мА в изначально четко отштупованном статичном дуговом канале либо образуются единичные, обширные, но не охватывающие весь разрядный промежуток диффузные зоны, которые, как правило, локализуются в прианодной части разря-

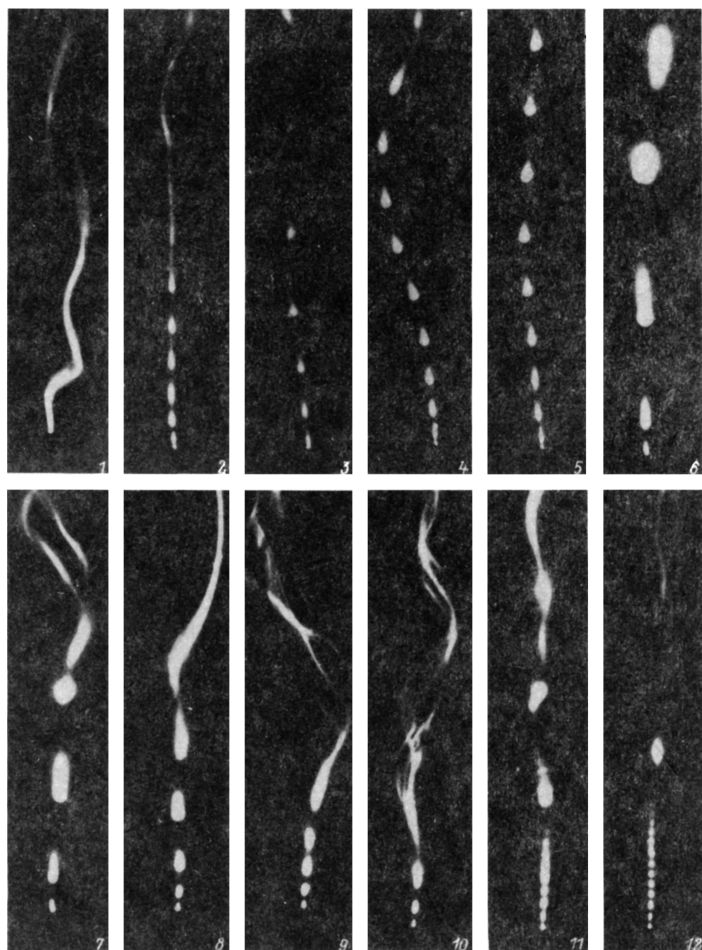


Рис. 5. Фрагментация положительного столба стационарного высоковольтного разряда при атмосферном давлении (катод расположен в нижней части снимков).

да (рис. 5,1), либо происходит преимущественно у катода стратификационное расслоение канала (рис. 5,2). При уменьшении разрядного тока эволюция первых обычно завершается разрушением целостности дугового канала и обрывом электрической цепи, образование же страт обеспечивает дальнейшее устойчивое, но фрагментированное существование положительного столба разряда.

Возникшие в результате расслоения канала страты или четки представляют собой последовательность обособленных друг от друга светящихся сферических образований с четко очерченной головной частью, обращенной к катоду, и затухающим шлейфом, направленным к аноду. Частота следования четок в межэлектродном промежутке, их форма, размер, а также протяженность шлейфа меняются в широких пределах в зависимости от величины разрядного тока и состава газовой смеси. Если протяженность шлейфа превышает межчеточное расстояние, что имеет место в начальной стадии фрагментации, то проводящий канал напоминает собой непрерывную светящуюся нить с яркими выпуклыми вкраплениями. Это отражено на рис. 5,2. На этом примере четко прослеживается сложный процесс структурной перестройки всего токового канала. По мере удаления от катода в каждой последующей четке наблюдается постепенное возрастание интенсивности свечения шлейфа. Когда она оказывается соизмеримой с интенсивности головной части страты, четка принимает бочкообразную форму. Далее в прианодной области реализуется мелкомасштабное диффузное расслоение контрагированного столба разряда.

С уменьшением разрядного тока от 30 до 10 мА весь межэлектродный промежуток заполняется обособленными друг от друга стратами (рис. 5,3-6). Максимальный размер четок диаметром до 1 см наблюдался при токе порядка 10 мА. Вид "гигантских" четок зафиксирован на рис. 5,6.

При вытеснении из межэлектродного промежутка со стороны анода аргона азотом или двуокисью углерода, т.е. газами с более высоким порогом контракции разряда, представляется возможным создать режим одновременного существования стратифицированной, диффузной и контрагированной формы разряда. Вид комбинированного разряда представлен на рис. 5,7-10. Положение границы раздела стратифицированной части разряда в межэлектродном промежутке в этом случае легко контролируется изменением состава неомогенной смеси газов. Увеличивая, например, содержание азота в аргоне, можно ее вплотную приблизить к катоду (рис. 5,10).

На рис. 5,11 и 12 зафиксирован разряд с двухмодовой фрагментацией токового канала. Заметим, что для стратифицированной формы разряда при атмосферном давлении характерна высокая статичность. При фиксированных значениях параметров стационарного разряда вид его остается практически неизменным в течение контрольного времени наблюдения до 30-60 с.

Представленные экспериментальные данные констатируют реальность факта существования стратифицированного положительного столба разряда при атмосферном давлении, свидетельствуют о многообразии форм фрагментации разряда и дают представление о динамике его развития в зависимости от величины разрядного тока или состава неомогенной смеси газа.

В заключение отметим, что обнаружение в лабораторных условиях процесса фрагментации положительного столба разряда при атмосферном давлении, с одной стороны, является веским аргументом в пользу высказанного предположения о стратификационной природе четочной молнии, с другой стороны дает основание рассматривать четочную молнию как рядовой случай самоорганизации слаботочного высоковольтного разряда в естественных условиях.

#### Список литературы

- [1] Барри Дж. Шаровая молния и четочная молния. М.: Мир, 1983.
  - [2] Смирнов Б.М. Проблема шаровой молнии. М.: Наука, 1988.
  - [3] Сингер С. Природа шаровой молнии. М.: Мир, 1973.
  - [4] Минин В.Ф., Бейбулатов Ф.К. // ДАН СССР. 1969. Т. 188. № 4. С. 795-798.
  - [5] Френкель Я.И. Теория явлений атмосферного электричества. М.: ГИТТЛ, 1949.
  - [6] Грановский В.А. Электрический ток в газе (установившийся ток). М.: Наука, 1971.
  - [7] Райзер Ю.П. Физика газового разряда. М.: Наука, 1987.
  - [8] Френсис Г. Ионизационные явления в газах. М.: Атомиздат, 1964.
  - [9] Мик Дж., Кнэгс Дж. Электрический пробой в газах. М.: ИЛ, 1960.
  - [10] Голубовский Ю.Б., Зонненбург Р. // ЖТФ. 1979. Т. 49. Вып. 2. С. 295-301.
  - [11] Голубовский Ю.Б., Зонненбург Р. // ЖТФ. 1979. Т. 49. Вып. 4. С. 754-757.
  - [12] Голубовский Ю.Б., Тележко В.М. // Опт. и спектр. 1983. Т. 54. Вып. 1. С. 60-67.
  - [13] Стекольников И.С. Физика молнии и грозозащита. М.: Изд. АН СССР, 1943.
  - [14] Голубовский Ю.Б., Некучаев В.О. // ЖТФ. 1982. Т. 52. Вып. 5. С. 864-867.
  - [15] Карабаджак Г.Ф., Песков В.Д. // ЖТФ. 1987. Т. 57. Вып. 5. С. 891-895.
  - [16] Голубовский Ю.Б., Некучаев В.О. // ЖТФ. 1982. Т. 52. Вып. 5. С. 858-863.
-