

# Молния — это не так сложно, как кажется

*С. ВАРЛАМОВ*

ЭТА СТАТЬЯ СВЯЗАНА С ДВУМЯ другими статьями в этом же номере журнала: «Электрическая машина в атмосфере» и «Дайте мне разбежаться!». В них рассматриваются механизмы разделения электрических зарядов в грозовой туче и процесс роста кинетичес-

кой энергии свободных электронов в газе, который находится в электрическом поле. Если вы уже прочли эти две статьи — смело беритесь за третью, а если нет — советуем это сделать, чтобы у вас сложилось цельное впечатление о рассматриваемых явлениях.

## Ионизация газа и образование лавин

Напомним, что при наличии внешнего электрического поля заряженные частицы в газе приобретают дополнительную кинетическую энергию, величина которой пропорциональна напряженности электричес-



Иллюстрация Е. Силиной

кого поля и обратно пропорциональна давлению газа. Установление конечной величины средней кинетической энергии заряженных частиц связано со столкновениями этих частиц с нейтральными молекулами. (Подробно эти вопросы обсуждаются в статье «Дайте мне разбежаться!»).

Кроме упругих столкновений, при достаточно большой энергии налетающей частицы (электрона) возможны и неупругие столкновения, при которых происходят ионизация нейтральных частиц и переход молекул в возбужденное состояние. Чтобы ионизация состоялась, суммарная кинетическая энергия сталкивающихся частиц в системе их центра масс должна быть достаточной для перехода атома или молекулы с нижнего энергетического уровня на верхний, а эта энергия значительно превышает среднюю энергию теплового движения молекул. Для «результативного» столкновения, при котором происходит ионизация, кинетическая энергия электрона перед ударом о нейтральную частицу должна быть больше энергии ионизации этого атома примерно в два раза: энергии налетающего электрона должно хватить на то, чтобы при столкновении с электроном атома сообщить ему энергию ионизации и чтобы самому улететь от образовавшегося положительно заряженного иона. Помимо того, эффективность ионизации определяется так называемым сечением ионизации, которое зависит от энергии налетающего электрона.<sup>1</sup> Максимум эффективности достигается при энергиях налетающего электрона в 4–10 раз больше минимальной энергии, необходимой для ионизации.

Средняя кинетическая энергия, приобретенная электроном при «продавливании» электронного газа через газ нейтральных молекул под действием электрического поля, равна

$$W = \left(\frac{M}{m}\right)^{1/2} \frac{eE\lambda}{2}$$

<sup>1</sup> От энергии электрона зависит связанная с ним длина волны де Бройля. Чем она меньше, тем меньше «сечение» (пропорциональное квадрату длины волны) самого электрона. В атоме электроны размазаны по пространству вокруг ядра с плотностью вероятности, зависящей от расстояния до ядра. При определенной энергии электрона сечение взаимодействия электрона с атомом имеет максимальное значение.

(вывод этой формулы приведен в статье «Дайте мне разбежаться!»). Видно, что она прямо пропорциональна длине свободного пробега  $\lambda$ , а значит, обратно пропорциональна концентрации (плотности) газа  $n$ , связанной с давлением газа соотношением  $p = nkT$ . Следовательно, для данной температуры и данного давления газа есть вполне определенное минимальное значение напряженности электрического поля, при котором возможна ионизация нейтральных частиц электронным ударом. Заметим, что в области с меньшим давлением (например, на высоте облака) условия для начала ионизации предпочтительнее, чем там, где давление высоко (вблизи поверхности земли).

Допустим, что при каждом столкновении электрона, движущегося со средней скоростью  $v_{\text{хаот}}$ , с нейтральной частицей вероятность ионизации равна  $\alpha$ , тогда за время  $\tau$  электрон испытает  $\tau v_{\text{хаот}} / \lambda$  столкновений и количество электронов может увеличиться в  $(1 + \alpha)\tau v_{\text{хаот}} / \lambda$  раз. (Конечно, при этом величина  $\alpha$  сама зависит от средней скорости электрона.) Наряду с ростом числа электронов имеет место и его уменьшение в процессе рекомбинации, т.е. образования нейтральных частиц при встрече отрицательно и положительно заряженных частиц. Динамическое уравнение зависимости концентрации электронов от времени выглядит так:

$$\frac{dN}{dt} = B + \alpha \frac{v_{\text{хаот}}}{\lambda} N - KN^2, \quad (\&)$$

где  $B$  – скорость образования электронов, определяемая «внешними» источниками (космическим излучением, радиоактивными источниками на земле и пр.),  $K$  – константа реакции рекомбинации, происходящей при встречах частиц с разными по знаку зарядами, причем концентрации этих частиц считаются одинаковыми, т.е.  $N_+ = N_- = N$ . Заметим, что в этом уравнении не учитывается термический механизм роста числа электронов, так как мы рассматриваем только начальную стадию пробоя газа.

Из приведенного уравнения (&) следует, что при включении внешнего электрического поля (при увеличении  $v_{\text{хаот}}$ ) в данной области газа начинается почти экспоненциальный рост концентрации электронов, если

имеются «затравочные» электроны и главную роль играет второй член в правой части уравнения. Однако самое важное то, что это уравнение объясняет неустойчивость однородного по пространству распределения электрического поля при достаточно большой его величине.

Действительно, если в какой-то небольшой области пространства напряженность электрического поля случайно увеличивается, то в этом месте возникает пробой газа. Хаотическое движение электронов вместе с направленным движением приводит к тому, что из одного затравочного свободного электрона образуется и расширяется область с повышенной концентрацией заряженных частиц – будем называть эту область лавиной. Перемещение заряженных частиц с разными знаками под действием электрического поля в лавине приводит к перераспределению зарядов в пространстве, уменьшению величины поля внутри области лавины и изменению напряженности электрического поля вне лавины – впереди и сзади лавины (если смотреть вдоль направления электрического поля) величина напряженности поля увеличивается, а с боков уменьшается (рис.1). Вследствие этого области лавин быстро вытягиваются вдоль направления электрического

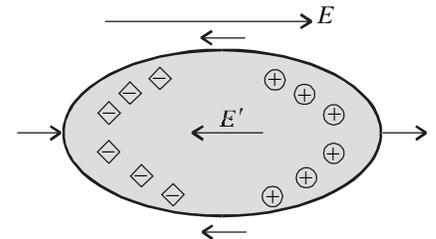


Рис.1

поля. Лавина существует некоторое время, а затем рассасывается, потому что уменьшенное электрическое поле не может поддерживать ионизацию и, соответственно, концентрацию заряженных частиц внутри лавины. Этот период времени жизни лавины определяется третьим членом в правой части уравнения (&).

### Размножение лавин, каналы, стример, молния

Процессы рекомбинации, которые идут в лавине параллельно с процессами ионизации, сопровождаются излучением большого числа квантов света. Энергия этих квантов как раз достаточна для ионизации нейтраль-

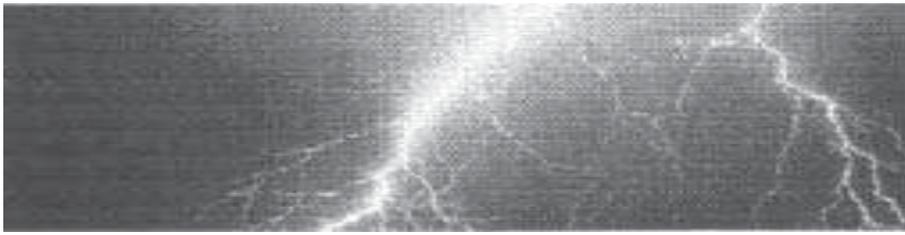


Рис.2

ных частиц, поэтому такие кванты света могут быть поглощены в газе там, где не было затравочных электронов. В результате на новом месте в газе возникает так называемая вторичная лавина.

В процессе расширения и вытягивания и первичные, и вторичные лавины объединяются, перекрываются, образуя хорошо проводящие каналы. Каналы возникают и через некоторое время пропадают. Напряженность поля вблизи концов таких каналов может в несколько раз превышать среднюю напряженность поля в газе до пробоя, поэтому каналы очень быстро (скорость достигает  $10^6$  м/с) увеличиваются в длине и соединяются с другими каналами, если они встречаются на пути. Этот процесс быстрого продвижения канала в газе от облака к земле называется стримером.

На стадии стримера самостоятельный разряд в газе похож на коронный разряд, т.е. он поддерживается за счет высокой напряженности электрического поля. Конечно, не всем стримерам доводится прорваться от облака до земли, большинство из них не доживает и рвется на части. Если за короткое время жизни нескольких каналов разветвленная и извилистая система этих объединившихся каналов в конце концов на каком-то из путей соединяет общим каналом облако с поверхностью земли, то стадия развития стримера заканчивается, и начинается стадия собственно молнии (рис.2). Ее-то мы и видим, и слышим.

Электрическая проводимость земли гораздо выше, чем проводимость воздуха, поэтому после достижения стримером поверхности земли ток по образовавшемуся проводящему каналу «облако – земля» резко увеличивается (возникает искровой разряд – молния), и при этом место главного механизма образования заряженных частиц занимает термодуцированная ионизация частиц.

«Дерево» соединившихся каналов обеспечивает возможность разряда только для некоторой части зарядов, накопившихся в облаке и, соответственно, на земле. Обычно «дерево» молнии обращено «стволом» вниз и многочисленными «ветвями» к небу. Пробой воздуха в молнии аналогичен пробой одного из конденсаторов в цепочке, изображенной на рисунке 3. Пробитый конденсатор разряжается практически полностью, а все остальные разряжаются лишь немного. Время разряда конденсатора определяется его емкостью и внутренним сопротивлением канала в конденсаторе.

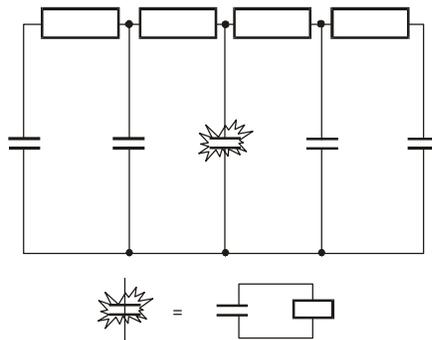


Рис.3

Вначале (сразу после пробоя), хотя напряженность электрического поля в канале уменьшается, ток в молнии быстро нарастает – это связано с увеличением числа носителей заряда вследствие нагрева газа и уменьшения сопротивления канала. По мере разрядки конденсатора мощность, подводимая к каналу молнии, уменьшается. После достижения максимума температура газа в канале молнии за счет излучения падает, заряженных частиц становится меньше, и разряд прекращается.

Основная доля потерь энергии приходится на излучение и нагрев газа в проводящем канале. В звук (в тот самый гром) переходит всего 2–3% энергии, в нагрев частиц в канале – раз в десять больше, т.е. 20–30%,

а все остальное – это излучение. (Звук производится в основном на стадии расширения в воздухе нагревающегося проводящего канала.)

Тепло, которое выделилось в канале молнии, рассеивается в окружающем воздухе значительно медленнее, чем происходят процессы пробоя газа, поэтому существующий некоторое время горячий канал облегчает повторные разряды вдоль того же пути. Часто бывает так, что молния бьет вдоль одного и того же канала несколько раз.

Основные выводы, которые можно сделать, таковы. Однородное в воздушном пространстве электрическое поле при достаточно большой напряженности становится неустойчивым. Возникающий пробой воздуха происходит так, что одной затравочной заряженной частицы (электрона) достаточно, чтобы образовалась обширная проводящая область газа – лавина. Излучение при рекомбинации заряженных частиц в первичных лавинах вызывает ионизацию молекул газа там, где затравочных частиц не было. Появившиеся здесь заряженные частицы становятся основателями вторичных лавин. Лавины вытягиваются вдоль электрического поля, перекрываются и образуют длинный проводящий канал, по которому проходит разряд молнии.

А в заключение – несколько задач для самостоятельного решения.

- Оцените величину напряженности электрического поля, при которой возможна ионизация молекул вследствие электронных ударов.
- Оцените энергию звуковых волн, которые были произведены молнией с длиной канала 10 км и средним диаметром канала 10 см.
- Объясните, почему в средних широтах грозы начинаются поздней весной (в мае) и заканчиваются осенью.

Информацию о журнале «Квант» и некоторые материалы из журнала можно найти в ИНТЕРНЕТЕ по адресам:

Курьер образования

<http://www.courier.com.ru>

Vivos Voco!

<http://www.vivovoco.nns.ru>

(раздел «Из номера»)