

04

Влияние влажности на свойства длинных стримеров в воздухе

© Н.Л. Александров, Э.М. Базелян, Д.А. Новицкий

Московский физико-технический институт
Энергетический институт им. Г.М. Кржижановского, Москва

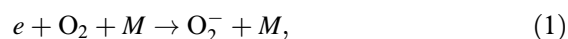
Поступило в Редакцию 21 ноября 1997 г.

Выполненное моделирование показывает, что многократно обсуждавшийся в литературе эффект затруднения развития стримера с увеличением влажности воздуха связан не с кинетикой отрицательных ионов (как считалось ранее), а с ускорением электрон-ионной рекомбинации.

Распространение стримеров — важная разрядная фаза пробоя длинных газовых промежутков. Вопрос о том, как меняются характеристики стримеров в воздухе при изменении его влажности, изучается на протяжении нескольких десятилетий (см., например, [1]). В последнее время повышенный интерес к нему вызван использованием стримерной короны и барьерного разряда для удаления окислов азота и серы из дымовых газов, в которых содержание воды может достигать 20% [2].

Эксперимент показывает, что увеличение влажности в воздухе препятствует развитию стримеров [1,3,4]. Это проявляется в уменьшении размеров стримерной короны, снижении переносимого по стримерам электрического заряда и повышении среднего поля, необходимого для перекрытия стримерной короной промежутка заданной длины. Величина этого поля многократно измерялась для различных электродных конфигураций, межэлектродных расстояний, форм подаваемого импульса напряжения, давления и влажности воздуха (см., например, [5,6]).

В настоящее время считается, что основной причиной наблюдаемых закономерностей является ускорение гибели электронов в процессе



который полагается основным механизмом их удаления в стримерном канале. Константа скорости процесса (1) для $M = H_2O$ примерно в десять раз выше этой величины для $M = O_2$ [7,8]. В качестве

возможной причины, препятствующей развитию стримеров во влажном воздухе, указывается и уменьшение скорости отрыва электронов от отрицательных ионов в канале стримера [1,9].

Несмотря на многократное обсуждение рассматриваемого вопроса в литературе, количественно он до сих пор теоретически не изучался. Поэтому высказанные предположения о механизме влияния влажности на свойства стримеров являются всего лишь гипотезами, основанными только на грубых качественных оценках.

Целью настоящей работы является численное моделирование длинного положительного стримера в воздухе при нормальных условиях в зависимости от его влажности. Для этого используется 1.5-D модель стримера, предполагающая постоянство радиуса стримерного канала, и достаточно подробная модель ионно-молекулярных процессов. Применительно к сухому воздуху они описаны ранее [10–12]. Главное отличие настоящей модели от использованной ранее состоит в учете реакций с участием компонентов, к появлению которых приводит наличие в воздухе паров воды. К ним относятся собственно молекулы H_2O , радикалы OH и ионы $\text{O}_2^+ + \text{H}_2\text{O}$, H_2O^+ , $\text{H}_3\text{O}^+(\text{H}_2\text{O})_n$ ($n = 0-3$), $\text{O}_2^-(\text{H}_2\text{O})_n$ ($n = 1, 2$) и $\text{OH}^-(\text{H}_2\text{O})_n$ ($n = 0-2$). Добавленные процессы включают в себя реакцию (1) с $M = \text{H}_2\text{O}$, ионно-молекулярные реакции преобразования положительных и отрицательных ионов, разрушение отрицательных ионов и электрон-ионную и ион-ионную рекомбинацию. Константы скорости перечисленных реакций взяты из [7,8,13–16]. Скорости ионизации молекул H_2O электронным ударом и диссоциативного прилипания электронов к этим молекулам считались теми же, что и для молекул O_2 . Это справедливо при не слишком высоких концентрациях H_2O , рассматриваемых в настоящей работе.

В расчетах моделировался катодонаправленный стример в промежутках с резко неоднородным и однородным распределениями электрического поля. В первом случае использовался уединенный сферический анод радиусом 1 см, а длина промежутка, перекрытого стримером, доходила до 20 см. Во втором — стример формировался между плоскими электродами. Моделировалась ситуация, когда стример стартовал из зоны с локально усиленным полем малой протяженности. Она создавалась сферой радиусом 0.1 см, которая размещалась на расстоянии 10 см от плоского катода. Относительно него на сферу подавалось дополнительное положительное напряжение 12 kV (около 10% от полного напряжения на промежутке); и сфера, таким образом,

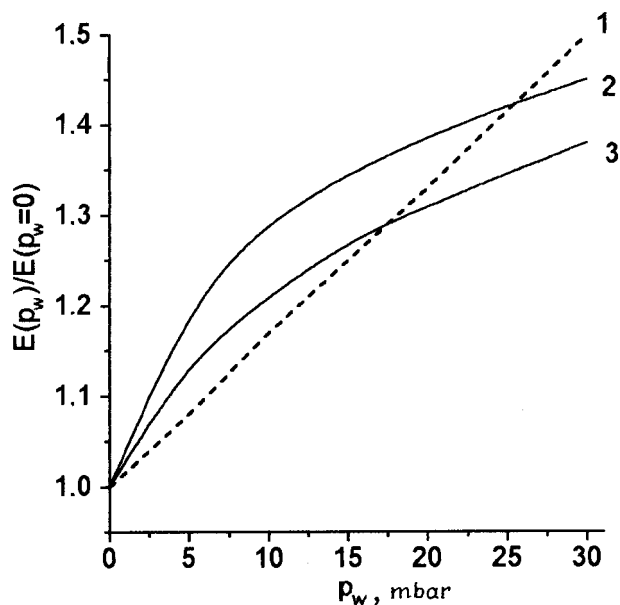


Рис. 1. Электрическое поле, необходимое для перекрытия разрядного промежутка в зависимости от парциального давления паров воды в воздухе: 1 — эксперимент [5], 2 — расчет для стримера длиной 10 см в однородном поле, 3 — расчет для стримера длиной 20 см в резко неоднородном поле.

выполняла роль анода. Уже при длине канала ~ 0.5 см стример покидал участок промежутка, возмущенного сферой, и далее продвигался в области внешнего однородного поля. Радиус стримерного канала принимался равным 0.03 см. Последнее дает хорошее согласие между расчетом и измерениями электрического поля, необходимого для перекрытия стримерами длинных промежутков в сухом воздухе [17].

На рис. 1 приведены результаты расчета среднего электрического поля, обеспечивающего перекрытие рассматриваемых промежутков стримером, в зависимости от парциального давления водяного пара. Там же приведены экспериментальные данные [5], полученные в сходных условиях для однородных промежутков длиной 9 см и хорошо согласующиеся с результатами других измерений (см., например, [6]).

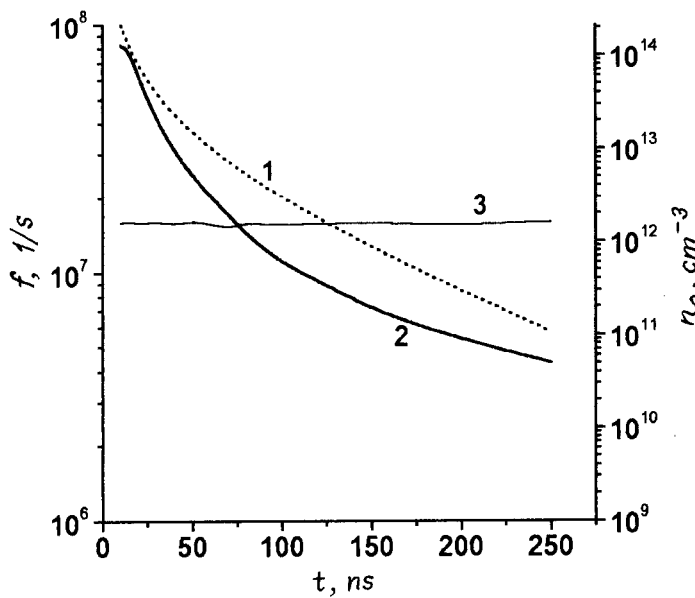


Рис. 2. Изменение во времени плотности электронов (кривая 1), частот гибели электронов в стримерном канале за счет диссоциативной рекомбинации с гидратированными ионами (кривая 2) и процесса (1) с $M = \text{H}_2\text{O}$ (кривая 3).

Согласие между расчетом и экспериментом дает основание считать, что используемая модель в целом правильно учитывает основные закономерности, связанные с увеличением влажности воздуха, и что с ее помощью можно анализировать механизмы влияния влажности на свойства длинных стримеров в воздухе.

На рис. 2 приведены типичные временные зависимости плотности электронов n_e и частот их гибели в стримерном канале. Здесь при парциальном давлении воды $p_w = 15 \text{ mbar}$ стример стартовал от сферического анода радиусом 1 см при напряжении 115 кВ, достаточном для формирования канала длиной 20 см; расчетная точка удалена от анода на 5.7 см. Как следует из рис. 2, основное снижение n_e и проводимости стримерного канала связано с электрон-ионной рекомбинацией. С увеличением влажности возрастает доля гидратированных ионов, у

которых скорость электронной рекомбинации больше, чем аналогичная величина для ионов в сухом воздухе [14–16]. Поэтому быстрее снижается проводимость стримерного канала, а следовательно, и потенциал головки стримера, где размещена зона ионизации. В результате растет величина внешнего поля, необходимого для перекрытия промежутка стримером.

Скорость процесса (1) также повышается с увеличением влажности воздуха. Однако выполненные расчеты показывают, что образование отрицательных ионов может стать важным только на поздних стадиях распада стримерного канала, когда плотность n_e и проводимость стримерного канала уже успевают снизиться почти на 2 порядка величины.

О важности рекомбинации электронов с гидратированными ионами и малой роли процессов прилипания свидетельствуют и численные эксперименты, в ходе которых в расчетной модели полностью выключались либо реакции гидратации положительных ионов, либо реакция (1) с $M = H_2O$. Первый расчет практически полностью нивелировал эффект влажности, дав при парциальном давлении 15 mbar всего 6.5%-ное увеличение среднего поля по сравнению с идеально сухим воздухом; во втором варианте расчета эффект влажности почти не менялся, снижаясь с 27 до 22%.

Таким образом, моделирование, выполненное в данной работе, свидетельствует о том, что многократно наблюдавшийся эффект более быстрого торможения длинных стримеров во влажном воздухе не связан с кинетикой отрицательных ионов в канале, как считалось ранее. Он объясняется гидратацией положительных ионов, ускоряющей электрон-ионную рекомбинацию и потерю проводимости стримерного канала.

Работа поддержана Госкомитетом РФ по высшему образованию (грант N 95-0-5.2-147).

Список литературы

- [1] Gallimberti I. // J. Physique. 1979. V. 40. N C7. P. 193–249.
- [2] *Non-Thermal Plasma Techniques for Pollution Control*. Ed. B.M. Penetrante and S.E. Schultheis. NATO ASI Series, Series G: Ecological Sciences. V. 34. Pt. B. Berlin: Springer, 1993. 397 p.
- [3] *Les Renardieres Group* // Electra. 1977. N 53. P. 5–153.

- [4] *Waters R.T.* Electrical breakdown in Gases. Ed. J.M. Meek and J.D. Craggs. New York: Wiley, 1978. P. 385–532.
- [5] *Phelps C.T., Griffiths R.F.* // J. Appl. Phys. 1976. V. 47. N 7. P. 2929–2934.
- [6] *Allen N.L., Boutlondj M.* // IEE Proc.-A. 1991. V. 138. N 1. P. 37–43.
- [7] *Смирнов Б.М.* Отрицательные ионы. М.: Атомиздат, 1978. 176 с.
- [8] *Александров Н.Л.* // УФН. 1988. Т. 154. № 2. С. 177–206.
- [9] *Lowke J.J.* // J. Phys. D: Appl. Phys. 1992. V. 25. N 2. P. 202–210.
- [10] *Базелян А.Э., Базелян Э.М.* // ТВТ. 1993. Т. 31. № 6. С. 867–874.
- [11] *Александров Н.Л., Базелян А.Э., Базелян Э.М.* и др. // Физика плазмы. 1995. Т. 21. № 1. С. 60–80.
- [12] *Aleksandrov N.L., Bazelyan E.M.* // J. Phys. D: Appl. Phys. 1996. V. 29. N 3. P. 740–752.
- [13] *Мак-Ивен М., Филлипс Л.* Химия атмосферы. М.: Мир, 1978. 375 с.
- [14] *Смирнов Б.М.* Комплексные ионы. М.: Наука, 1983. 150 с.
- [15] *Mitchell J.B.A.* // Phys. Rep. 1990. V. 186. N 5. P. 215–248.
- [16] *Johnsen R.* // J. Chem. Phys. 1993. V. 98. N 7. P. 5390–5395.
- [17] *Aleksandrov N.L., Bazelyan E.M.* // J. Phys. D: Appl. Phys. 1996. V. 29. N 11. P. 2873–2880.