

Это объясняется тем, что для металлов  $n=2-4$  в уравнении (1) и диапазон  $E_0/S$ , когда  $P \approx P_x$ , очень мал.

В заключение следует сказать, что полученные данные свидетельствуют о серьезном влиянии газодинамических процессов в околофакельном пространстве на формирование осцилляций давления на мишени. Этими процессами, например эжекцией, можно объяснить отрицательные значения давления, возникающие при воздействии потока на «нерабочую» часть мишени, консерватизм амплитуды осцилляций при увеличении  $E_0/S$ . В этот механизм вписываются логично исчезновение осцилляций при истечении факела в вакуум и изменение амплитуды осцилляций при изменении состава окружающего газа. Наконец, при уменьшении «нерабочей» части мишени, когда диаметры мишени, акустопровода датчика и пятна облучения близки, осцилляции также исчезают, что демонстрирует верхняя кривая на рис. 3, полученная при  $E_0/S=80$  Дж/см<sup>2</sup> и диаметре пятна облучения 20 мм.

#### Список литературы

- [1] Ширяков Б. М., Попов Н. И., Самогин А. А. // ЖЭТФ. 1978. Т. 75. Вып. 2 (8). С. 494—503.
- [2] Углов А. А., Селищев С. В. Автоколебательные процессы при воздействии концентрированных потоков энергии. М.: Наука, 1987. С. 149.
- [3] Самогин А. А. // Тр. ИОФАН. М.: Наука, 1988. Т. 13. С. 3—98.
- [4] Кутателадзе С. С., Кузнецов Л. И., Завьялов В. И. // Тез. докл. VI Всесоюз. конф. по динамике разреженных газов. Новосибирск, 1979. С. 147.

Институт теплофизики СО АН СССР  
Новосибирск

Поступило в Редакцию  
2 августа 1989 г.

03; 04

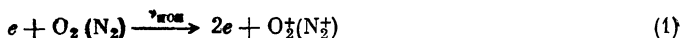
Журнал технической физики, т. 60, в. 8, 1990

© 1990 г.

### ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ПРОБОЙ В АТМОСФЕРЕ С ПРИМЕСЬЮ ОЗОНА

А. В. Елецкий, Б. М. Смирнов

Электрический пробой в атмосферном воздухе является результатом конкуренции между процессами ионизации молекул электронным ударом



и диссоциативного прилипания электрона к молекуле кислорода



Исходя из этого простейшее условие пробоия в чистом воздухе формулируется как равенство между частотами процессов (1) и (2) [1]

$$\nu_{\text{ион}} = \nu_{\text{прил}} \quad (3)$$

Указанный критерий пробоия хорошо выполняется в экспериментах по пробою длинных разрядных промежутков [1]. Согласно этому критерию, значение приведенного пробойного поля составляет  $E/N \approx 85$  Тд.

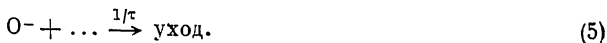
Однако в естественных атмосферных условиях величина пробойного поля существенно ниже указанного значения и находится в зависимости от состояния атмосферы в диапазоне 3—10 Тд [2]. Очевидно, причинам такого различия в условиях пробоия связаны с наличием в атмосферном воздухе различных примесных газов, существенно усложняющим картину процессов, сопутствующих пробою. Эти примеси, некоторые из которых изначально присутствуют в атмосфере, а другие нарабатываются в результате протекания в электризованной атмосфере плазмохимических процессов, могут играть в кинетике пробоия многообразную роль. Одно из наиболее заметных проявлений примесей связано с процессами разрушения отрицательных ионов  $O^-$ , которые приводят к образованию свободных электронов и, естест-

венно, облегчают развитие пробоя. В данной работе анализируется влияние такой примеси на условие пробоя в атмосфере. Конкретные расчеты выполнены для атмосферы с примесью озона, который обычно образуется в электризованной атмосфере.

Рассмотрим начальную стадию пробоя, когда можно пренебречь плазменными и нелинейными эффектами. Наряду с процессами ионизации (1) и прилипания (2) будем учитывать также процесс разрушения отрицательных ионов  $O^-$  при соударении с частицами примеси



и процесс гибели отрицательных ионов (например, образование ионов с более высокой энергией сродства к электрону ( $O_3^-, NO_2^-, NO_3^-$ ), прилипание к аэрозолям, уход на стенку)



В частности, один из процессов потери отрицательных ионов  $O^-$  в присутствии озона протекает по схеме  $O^- + O_3 \rightarrow O_3^- + O$  и характеризуется константой скорости  $8 \cdot 10^{-10}$  см<sup>3</sup>/с. Поскольку энергия сродства  $O_3$  к электрону существенно превышает соответствующую величину для  $O$ , то этот процесс необратим.

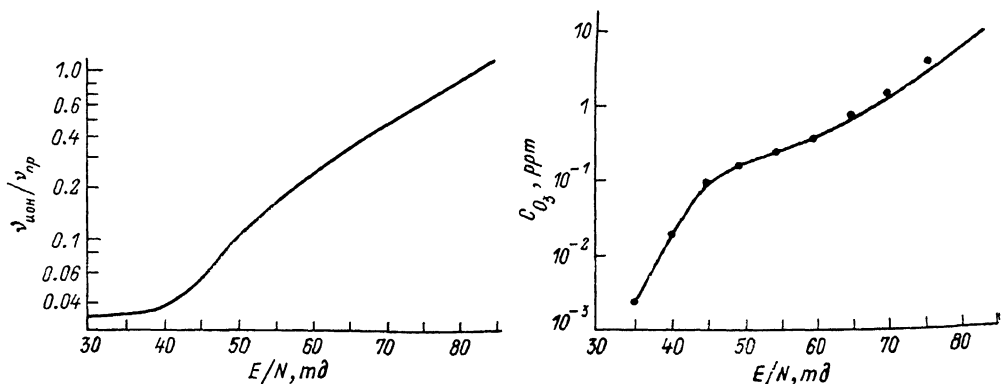


Рис. 1. Зависимость отношения частот ионизации и прилипания электронов в воздухе от приведенной напряженности электрического поля.

Рис. 2. Зависимость концентрации озона, вызывающей снижение пробойной напряженности в атмосферном воздухе на 10 %, от приведенной напряженности электрического поля.

В рамках рассматриваемой модели имеем следующие уравнения баланса для плотности электронов  $N_e$  и отрицательных ионов  $N_-$ :

$$\frac{dN_e}{dt} = (\nu_{\text{ион}} - \nu_{\text{прил}}) N_e + \nu_p N_-, \quad (6)$$

$$\frac{dN_-}{dt} = \nu_{\text{прил}} N_e - (\nu_p + 1/\tau) N_-. \quad (7)$$

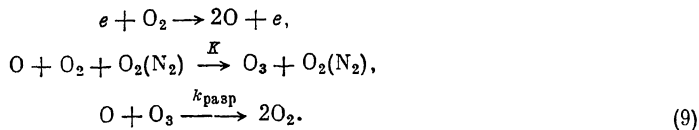
Будем считать, что пробой отвечает экспоненциальному росту плотности электронов и ионов. Задавая  $N_e, N_- \sim \exp(\lambda t)$ , получим на основании системы (6), (7) условие пробоя ( $\lambda > 0$ )

$$\beta = \nu_{\text{ион}}/\nu_{\text{прил}} > 1/(1 + \nu_p \tau). \quad (8)$$

На рис. 1 представлена зависимость параметра  $\beta$  от приведенной напряженности электрического поля, рассчитанная на основе экспериментальных данных [3, 4]. Как видно, принятое в качестве пробойной напряженности электрического поля для атмосферного воздуха значение  $E/N \approx 85$  тд соответствует  $\beta = 1$ , т. е. значению параметра  $\nu_p \tau = 0$ .

Анализируя процессы с участием электронов и отрицательных ионов, следует отметить, что значения коэффициентов  $\nu_{\text{ион}}$ ,  $\nu_{\text{прил}}$  и  $\nu_p$  слабо зависят от параметров реального воздуха, в то время как значение параметра  $\tau$ , весьма чувствительное к влажности воздуха, присутствию в нем пыли, примесей и радикалов, практически непредсказуемо.

Проанализируем один из механизмов понижения пробойного значения электрического поля для атмосферного воздуха, который связан с накоплением в атмосфере озона. Озон образуется в атмосфере под действием слабых электрических токов по следующей схеме:



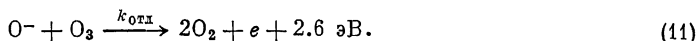
В рамках рассматриваемой схемы процессов максимальная плотность озона  $[O_3]_{\text{max}}$  определяется соотношением

$$[O_3]_{\text{max}}/[O_2] = \{K(O_2)[O_2] + K(N_2)[N_2]\}/k_{\text{разр}}, \tag{10}$$

где  $[X_2]$  — плотность молекул  $X_2$ ,  $K(X_2)$  — константа скорости тройного процесса с участием молекул  $X_2$ .

Пользуясь современными значениями для констант скоростей соответствующих процессов [5], получим, например, для атмосферного воздуха при  $T=300$  К  $[O_3]_{\text{max}}/[O_2]=1\%$ . Реально в игру могут вступать другие процессы, понижающие концентрацию озона. Однако данная оценка показывает, что концентрация озона в атмосфере может быть достаточно большой и на порядки превышать концентрации радикалов в электризованном воздухе.

Влияние озона на пробой в воздухе сказывается при гораздо более низких концентрациях. Анализ показывает, что наиболее существенным в этом плане является процесс



Этот процесс добавляется к процессу (4) и способствует понижению пробойной напряженности.

На рис. 2 представлена зависимость концентрации озона, вызывающей 10%-ное понижение величины пробойной напряженности, от отношения  $E/N$ . Эта зависимость рассчитана на основании выражения (8), где в качестве механизма отлипания электрона от иона  $O^-$  использован процесс (11), а в качестве механизма гибели ионов  $O^-$  — процесс



Константа процесса (11) рассчитывалась на основе модели поляризационного захвата, а для расчета константы (12) использовались результаты прямого измерения сечения [6]. Как видно из результатов расчета, которые ввиду низкой точности значений используемых констант носят качественный характер, условия пробоя в воздухе оказываются весьма чувствительными к наличию примеси озона. Резкая зависимость степени чувствительности от приведенной напряженности электрического поля обусловлена резким, пороговым характером зависимости константы скорости процесса (12) от этого параметра. При наличии других каналов гибели ионов  $O^-$  эта зависимость может оказаться менее резкой, однако вывод о существенном влиянии малейших (на уровне ppm) примесей озона на условия пробоя в воздухе имеет общий характер.

#### Список литературы

- [1] Браун С. Элементарные процессы в плазме газового разряда. М.: Госатомиздат, 1961. С. 184.
- [2] Moore C. B., Vonnegut B. // *Lightning* / Ed. R. H. Golde. London: Academic Press, 1977. P. 51—72. Berger K. // *Ibid.* P. 119—136.
- [3] AlAtin S. A., Kisejkarpaci N. H., Lucas J. // *J. Phys. D.* 1985. Vol. 18. P. 1781—1790.
- [4] Мнацаканян А. Х., Найдис Г. В. // *Химия плазмы* / Под ред. Б. М. Смирнова. М.: Энергоатомиздат, 1987. Вып. 14. С. 227—255.
- [5] Смирнов Б. М. // *ЖТФ.* 1977. Т. 47. Вып. 2. С. 814—820.
- [6] Месси Г. Отрицательные ионы. М.: Мир, 1979. 596 с.

Институт атомной энергии  
им. И. В. Курчатова  
Москва

Поступило в Редакцию  
9 августа 1989 г.