

**КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ
ХИМИЧЕСКАЯ ФИЗИКА, ФИЗИЧЕСКАЯ КИНЕТИКА И ФИЗИКА ПЛАЗМЫ**

Околопробойные характеристики воздуха в нижних слоях атмосферы

А. Ф. Александров, В. Л. Бычков^a, С. А. Волков

*Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, физический факультет,
кафедра физической электроники. Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2.
E-mail: ^abychvl@orc.ru*

Статья поступила 19.03.2010, подписана в печать 29.09.2010

Настоящая работа посвящена анализу процессов ионизации и гибели электронов на ранних стадиях развития электрического разряда в воздухе на высотах 0–12 км. В работе рассмотрены процессы ионизации во внешнем электрическом поле и фоновой ионизации, прилипания и отлипания электронов от атомарного и молекулярного кислорода, перезарядки и конверсии отрицательных ионов. Учтены зависимости констант скоростей процессов от давления. Показано, что с высотой происходит снижение электрического поля, при котором начинается эффективная ионизация воздуха.

Ключевые слова: плазма, ионизация, пробой, элементарные процессы.

УДК: 533.92. PACS: 52.20.Hv.

Введение

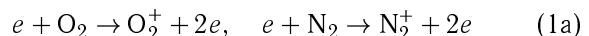
В работах [1, 2], посвященных исследованиям ионизационных процессов в воздухе на уровне облаков (4–6 км и выше), показано, что измеренное пробойное напряжение воздуха составляет 3 кВ/см и даже ниже, что значительно ниже пробойного напряжения около земли. В работах [2, 3] такое снижение пробойного поля связывалось с накоплением озона в ионизованной атмосфере. В работе [4] снижение пробойных полей связывалось с ролью метастабильных молекул кислорода. В то же время причины предпробойных явлений, их пороговый характер и их изменение с высотой в этих работах не обсуждались. Кроме того, не было показано, как пробойное поле, хорошо известное на уровне Земли, изменяется с высотой.

Целью настоящей работы являются: выяснение величины возможного пробойного поля основных элементарных процессов при ионизации разрядом типа тлеющего на высотах ниже 12 км исходя из известных значений пробойного поля на уровне земли и зависимостей давления и температуры воздуха с высотой; попытка объяснения возможности реализации низких значений напряженности поля на уровне облаков по сравнению с пробойным полем при нормальных условиях.

1. Элементарные процессы в воздухе в околокритических электрических полях на начальной стадии пробоя

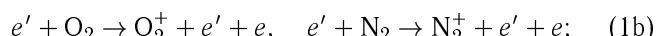
В дальнейшем при анализе ионизационных процессов будем рассматривать диапазон давлений воздуха, которыми характеризуется атмосфера на высотах ниже 12 км. Следуя работе [5], будем считать, что концентрация электронов N_e определяется следующими процессами, которые идут интенсивно в тлеющих разрядах на уровне земли и в облаках:

1) прямой ионизацией молекул O_2 и N_2 медленными электронами e [6, 7]:

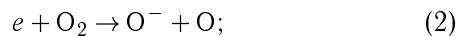


с созданием ионов O_2^+ и N_2^+ и электронов e ;

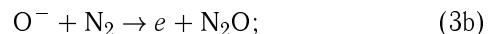
2) атмосферной фоновой ионизацией быстрыми электронами e' [8], важной при анализе атмосферной ионизации:



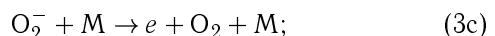
3) диссоциативным прилипанием электронов к молекулам O_2 с созданием отрицательного иона O^- и атома O , этот процесс — важнейший в условиях разряда [9] — определяет один из каналов гибели электрона при высоком давлении:



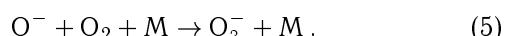
4) процессами отлипания электронов от ионов O^- при значениях параметра $E/N \approx (60 \div 150)$ Тд (1 Тд = 10^{-17} В·см², E — напряженность электрического поля, N — концентрация нейтральных молекул) в воздухе [6]:



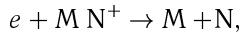
5) процессом отлипания электрона от молекулярного иона O_2^- при $E/N \approx (60 \div 150)$ Тд при столкновении с нейтральными молекулами в смеси [6]:



6) мы учитываем, что ионы O_2^- и O_3^- появляются при $E/N > 50$ Тд в реакциях [6, 9]



На начальной стадии ионизации мы не рассматриваем процесс диссоциативной рекомбинации электронов с молекулярными ионами MN^+ [9]



который имеет значение при достаточно высоких концентрациях ионов ($\sim 10^{14}$ см $^{-3}$), не реализующихся на начальной стадии ионизации воздуха.

2. Баланс электронов в плазме и условия реализации ионизации в околособойных электрических полях

Приведем систему уравнений баланса для электронов N_e и отрицательных ионов O^- и O_2^- с концентрациями N_{O^-} и $N_{O_2^-}$ в условиях атмосферы на уровне облаков и ниже на начальном этапе ионизации:

$$\frac{dN_e}{dt} = Q + (\nu_i - \nu_a)N_e + (\nu_{det1} + \nu_{det2})N_{O^-} + \nu_{det3}N_{O_2^-}, \quad (6)$$

$$\frac{dN_{O^-}}{dt} = \nu_a N_e - (\nu_{det1} + \nu_{det2} + \nu_{ch1} + \nu_{ch2})N_{O^-}, \quad (7)$$

$$\frac{dN_{O_2^-}}{dt} = \nu_{ch1}N_{O^-} - \nu_{det3}N_{O_2^-}. \quad (8)$$

Здесь $\nu_i = k_i N$, $N = N_{N_2} + N_{O_2}$ — полная концентрация молекул; N_{N_2} , N_{O_2} — соответственно концентрации молекул азота и кислорода; k_i — константа скорости процесса прямой ионизации (1а); Q — скорость процесса фоновой ионизации в единице объема в единицу времени (1б); $\nu_a = k_a N_{O_2}$, где k_a — константа скорости процесса (2); $\nu_{det1} = k_{det1} N$, где k_{det1} — константа скорости отлипания (3а); $\nu_{det2} = k_{det2} N_{N_2}$, где k_{det2} — константа скорости процесса отлипания (3б); $\nu_{det3} = k_{det3} N_{O_2}$, где k_{det3} — константа скорости процесса отлипания (3с); $\nu_{ch1} = k_{ch1} N_{O_2}$, где k_{ch1} — константа скорости процесса перезарядки (4); $\nu_{ch2} = k_{ch2} N_{O_2} N$, где k_{ch2} — константа скорости процесса конверсии (5).

При составлении этой системы уравнений мы не рассматривали процессы диффузии заряженных частиц, которая характеризуется диффузионной частотой [11] $\nu_d = D/\Lambda^2$, где D — коэффициент электронной диффузии, и Λ — типичная диффузионная длина [11]. Случай тлеющего разряда соответствует выполнению условий

$$\nu_a > \nu_d, \quad \nu_a > v_{dr}/L,$$

где L — расстояние между электродами, v_{dr} — дрейфовая скорость заряженных частиц.

Оценки показывают [5], что в воздухе при атмосферном давлении даже при довольно низких значениях $E/N \approx 40 \cdot 10$ Тд данное рассмотрение справедливо при длинах межэлектронного расстояния более 1 см.

Константы скорости реакций (3а), (3с) и (4) имеют сильную зависимость от энергий ионов [6], что учтено при рассмотрении разряда в постоянном электрическом поле.

Для анализа константы скорости прямой ионизации и диссоциативного прилипания ν_i , ν_a в постоянном электрическом поле для условий положительного столба тлеющего разряда в воздухе взяты из [10].

Значения констант скоростей реакций (3а)–(3с) были также взяты из [6] (с учетом соответствующей

доли компоненты в воздухе). Зависимость константы скорости k_{ch1} перезарядки от E/N получена из [6, 9], константа скорости конверсии k_{ch2} (5) взята оттуда же.

На рис. 1. представлены зависимости констант скоростей основных электрон-молекулярных процессов от параметров E/N из указанной литературы.

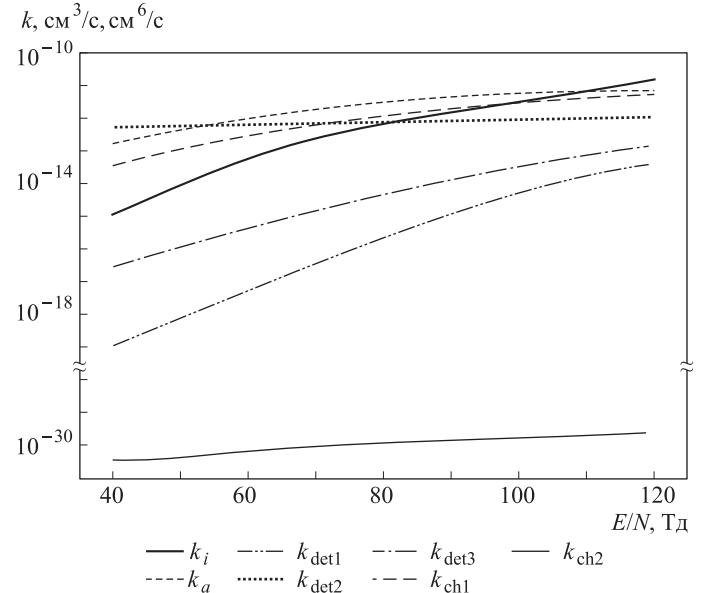


Рис. 1. Константы скоростей процессов в воздухе: k_i — константа прямой ионизации молекул воздуха электронным ударом [10]; k_a — константа скорости процесса диссоциативного прилипания электронов к молекулам кислорода [10]; k_{det1} — константа скорости отлипания в реакции (3а) [6]; k_{det2} — константа скорости отлипания электрона в реакции (3б) [6]; k_{det3} — константа скорости отлипания электрона в реакции (3с) [6]; k_{ch1} — константа скорости процесса перезарядки (4); k_{ch2} — константа скорости конверсии ионов (5) [6]

Система уравнений баланса заряженных частиц (6)–(8) сводится к уравнению

$$\frac{d^3N_e}{dt^3} + (a_5 + a_3 - a_1) \frac{d^2N_e}{dt^2} - (a_1(a_3 + a_5) + a_2a_4 - a_3a_5) \frac{dN_e}{dt} - a_3((a_2 + a_6)a_4 + a_1a_5)N_e - a_3a_5Q = 0, \quad (9)$$

где $a_1 = \nu_i - \nu_a$, $a_2 = \nu_{det1} + \nu_{det2}$, $a_3 = \nu_{det3}$, $a_4 = \nu_a$, $a_5 = \nu_{det1} + \nu_{det2} + \nu_{ch1} + \nu_{ch2}$, $a_6 = \nu_{ch1}$. Одно из решений уравнения (9) имеет следующую форму, которая удовлетворяет условию роста концентрации электронов во времени:

$$N_e = \frac{a_5 Q}{a_1 a_5 + (a_2 + a_6) a_4} (\exp(\nu_{eff} t) - 1), \quad (10)$$

где ν_{eff} может быть получено при решении однородной части уравнения (9).

Следует подчеркнуть, что $N_e = 0$ при $Q = 0$. Знаменатель в (10) должен быть положительным, чтобы существовало решение уравнения (10). Этому соответствует условие

$$\nu_i(\nu_{det1} + \nu_{det2} + \nu_{ch2} + \nu_{ch1}) - \nu_a \nu_{ch2} > 0. \quad (11)$$

Очевидно, что условие (11) реализуется при решении системы уравнений (6)–(8) лишь при $Q > 0$.

Для определения пробойного поля, при котором начинается ионизация, необходимо в данном диапазоне параметра E/N на основе неравенства (11) определить наименьшее значение параметра E/N , при котором оно выполняется. При этом необходимо проварьировать по E/N зависимости частот процессов, входящих в формулу (11).

Решение системы уравнений (10) показывает на пороговый характер ионизации. Именно учет фоновой ионизации в уравнениях приводит к физически правильному решению. При малых временах решение системы уравнений имеет вид

$$N_e \sim \frac{a_3 Q \nu_{\text{eff}} t}{a_1 a_5 + (a_2 + a_6) a_4} \sim \frac{\nu_{\text{det } 3} Q \nu_{\text{eff}} t}{\nu_i (\nu_{\text{det } 1} + \nu_{\text{det } 2} + \nu_{\text{ch } 2} + \nu_{\text{ch } 1}) - \nu_a \nu_{\text{ch } 2}} \sim C_1 t, \quad (12)$$

при больших временах оно приобретает вид

$$N_e \sim \frac{a_3 Q}{a_1 a_5 + (a_2 + a_6) a_4} \exp(\nu_{\text{eff}} t) \sim \frac{\nu_{\text{det } 3} Q}{\nu_i (\nu_{\text{det } 1} + \nu_{\text{det } 2} + \nu_{\text{ch } 2} + \nu_{\text{ch } 1}) - \nu_a \nu_{\text{ch } 2}} \exp(\nu_{\text{eff}} t) \sim C_2 \exp(\nu_{\text{eff}} t), \quad (13)$$

где C_1 и C_2 — константы.

В существующей литературе по газовым разрядам, как правило, используется асимптотика (13) решения (10) при $t \rightarrow \infty$, и вопрос о пороге ионизации практически не рассматривается корректно. В случае ионизации при преобладании диффузии можно получить решение, аналогичное (10), включающее диффузионный член.

3. Изменение пробойного поля в воздухе с высотой

На рис. 2 приведена зависимость температуры и концентрации нейтралов от высоты, полученная для модели стандартной атмосферы [12].

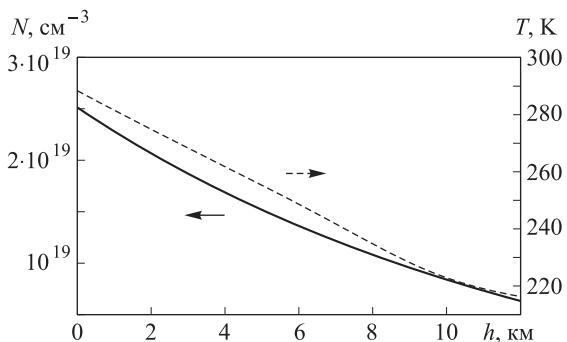


Рис. 2. Концентрация нейтралов N и температура атмосферы T в зависимости от высоты над землей

Оценки показывают, что в рассматриваемом диапазоне температур константы скоростей элементарных процессов меняются мало, и поэтому изменение предпробойных полей с высотой будет в основном характеризоваться изменением концентраций молекул в воздухе с высотой.

На рис. 3 построены зависимости пробойного электрического поля и приведенного электрического поля от высоты, полученные на основе соотношения (11).

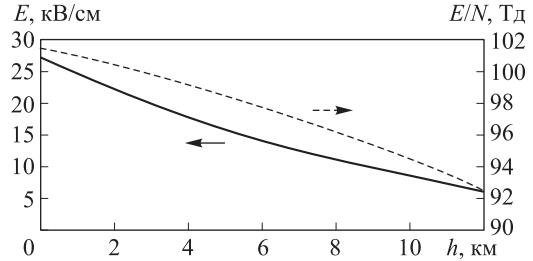


Рис. 3. Зависимости напряженности пробойного электрического поля E (кВ/см) и параметра E/N (1 Тд = $1 \cdot 10^{-17}$ В·см 2) от высоты над землей

Заключение

Расчет показывает, что поле, при котором происходит эффективная ионизация воздуха на уровне поверхности земли, при нормальных условиях оказывается равным $E = 27.3$ кВ/см, а значение $E/N = 101 \cdot 10^{-17}$ В·см 2 , эти значения хорошо согласуются с результатами по пробойному полю $E = 26.6$ кВ/см в воздухе в разряде между плоскими электродами [13], что подтверждает правильность представленного подхода к определению пробойных характеристик.

Пробойное поле значительно падает с высотой вплоть до значения ~ 6 кВ/см на высоте ~ 12 км. В тоже время значения E/N падают незначительно ($\sim 10\%$), что связано также с резким (см. рис. 2) уменьшением концентрации нейтралов с высотой.

Расчет показывает, что поле, при котором происходит эффективная ионизация воздуха, падает до 6 кВ/см, что отличается от приведенных в [1, 2] экспериментальных результатов в два раза. Такая разница между полученными выше результатами и указанными экспериментальными данными может быть объяснена наличием в облаках снежинок, на остриях которых происходит усиление электрического поля и около которых инициируются ионизационные процессы. Это может также объясняться тем, что электроды в этих экспериментах были штыревого типа, и с них началось развитие стримерных разрядов, для которых необходимо специальное рассмотрение, выходящее за рамки настоящей работы.

Список литературы

1. Gunn R. // J. Appl. Phys. 1948. **19**, N 5. P. 481.
2. Елецкий А.В., Смирнов Б.М. // ЖТФ. 1991. **61**, № 10. С. 70.
3. Елецкий А.В., Смирнов Б.М. // ЖТФ. 1990. **60**, № 8. С. 192.
4. Lowke J.J. // J. Appl. Phys. 1992. **25**, N 2. P. 202.
5. Александров А.Ф., Бычков В.Л., Грачев Л.П. и др. // Хим. физика. 2008. **27**, № 2. С. 5.
6. Mnatsakanyan A.Kh., Naidis G.V. // Reviews of Plasma Chemistry / Ed. by B. M. Smirnov. N.Y., 1991. P. 259.
7. Акишев Ю.С., Дерюгин А.А., Кочетов И.В. и др. // Физика плазмы. 1996. **20**, № 6. С. 585.
8. Israel H. // Israel program for Scientific Translations. Jerusalem, 1971. **1**. P. 30.

9. Смирнов Б.М. Ионы и возбужденные атомы в плазме. М., 1974.
10. Александров Н.Л., Высикало Ф.И., Исламов Р.Ш. и др. // ТВТ. **19**, № 1. С. 22.
11. Райзэр Ю.П. Физика газового разряда. М., 1992.
12. Кикоин И.К. Таблицы физических величин. М., 1976.
13. Ремер Г. Электронные лавины и пробой в газах. М., 1968.

Breakdown characteristics of air in the bottom layers of atmosphere

A. F. Aleksandrov, V. L. Bychkov^a, S. A. Volkov

Department of Physical Electronics, Faculty of Physics, M. V. Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia.

E-mail: ^abychvl@orc.ru.

The present article is devoted to the analysis of ionization and electrons elimination processes destruction at early stages of the electric discharge development in air at heights of 0–12 km. In it ionization processes in the external electric field and background ionization, electron attachment and electron detachment from atomic and molecular oxygen, charge exchange and conversion of negative ions are considered. Dependences of processes rate constants on pressure are considered. It is shown that there is an electric field decrease with height at which the effective air ionization begins.

Keywords: plasma, ionization, breakdown, elementary processes.

PACS: 52.20.Hv.

Received 19 March 2010.

English version: *Moscow University Physics Bulletin* 1(2011).

Сведения об авторах

1. Александров Андрей Федорович — докт. физ.-мат. наук, профессор, зав. кафедрой; тел.: (495) 939-25-74, e-mail: alex@pele60-1.phys.msu.ru.
2. Бычков Владимир Львович — докт. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр., вед. науч. сотр.; тел.: (499) 124-39-36, e-mail: bychvl@orc.ru.
3. Волков Сергей Александрович — студент.