

УДК 537.56

В. С. Гнатюк, Н. Н. Морозов

**Физические основы электропроводности сильно ионизированного воздуха**

V. S. Gnatyuk, N. N. Morozov

**Physical bases of conductivity of strongly ionized air**

**Аннотация.** Исследован процесс возбуждения электропроводности воздуха импульсным пучком релятивистских электронов. Показано, что электропроводность воздуха при нормальном давлении определяется поведением электронной компоненты, которая с временным разрешением порядка  $10^{-8}$  с повторяет изменения электронного потока. Рассмотрена возможность абсолютных измерений мощности экспозиционной дозы в широком диапазоне интенсивности излучения.

**Abstract.** The excitement of air conductivity by a pulse bunch of relativistic electrons has been studied in the work. It has been shown that conductivity of air at normal pressure is defined by behavior of electronic components which with time permission of the order  $10^{-8}$  s repeats changes of an electronic stream. The possibility of absolute measurements of exposition dose power in the wide range of radiation intensity has been considered.

**Ключевые слова:** воздух, ионизация, электропроводность.

**Key words:** air, ionization, conductivity.

**Введение**

При решении прикладных задач, связанных с зоной ионизации мощных импульсных источников ионизирующего излучения, возникает необходимость исследования шунтирующих свойств ионизированного воздуха. Например, в ходе радиационных испытаний электрические цепи электронных устройств могут значительно шунтироваться ионизированным воздухом, что приводит к значительным искажениям результатов этих испытаний. Шунтирующие свойства ионизированного воздуха представляют интерес также при различных электрических измерениях в зоне ионизации электронных ускорителей, которые широко используются в процессе разработки высоких технологий.

**Электропроводность сильно ионизированного воздуха**

Воздействие на воздух любого ионизирующего излучения сводится к образованию в нем лавин вторичных электронов. Рожденные на последних стадиях электронных лавин вторичные электроны, имеющие энергию меньше потенциала ионизации, определяют электрофизические свойства ионизированного воздуха. Проводимость ионизированного воздуха в этом случае определяется как процессами ионизации, так и целым комплексом различных деионизационных процессов (электрон-ионная рекомбинация, ион-ионная рекомбинация, прилипание электронов к нейтральным молекулам кислорода). В статье представлены результаты исследования проводимости воздуха в условиях его облучения нестационарной радиацией (энергия релятивистских электронов порядка 1 МэВ).

Проводимость ионизированного газа может быть записана в виде

$$\sigma = e (\mu_{\text{ион}}^+ N_+ + \mu_{\text{ион}}^- N_- + \mu_{\text{эл}} n), \quad (1)$$

где  $\mu_{\text{ион}}^+$ ,  $\mu_{\text{ион}}^-$ ,  $\mu_{\text{эл}}$  – подвижность положительных, отрицательных ионов и электронов соответственно;  $N_+$ ,  $N_-$ ,  $n$  – их концентрации.

Концентрации электронов и ионов найдем из уравнения баланса между скоростями ионообразования и деионизационных процессов:

$$\begin{aligned} \frac{\partial n}{\partial t} &= q - \alpha N_+ n - \gamma n, \\ \frac{\partial N_+}{\partial t} &= q - \alpha N_+ n - \beta N_+ N_-, \\ \frac{\partial N_-}{\partial t} &= \gamma n - \beta N_+ N_-, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $q$  – число электрон-ионных пар, образующихся в  $1 \text{ см}^3$  воздуха в течение 1 с под влиянием излучения;  $\gamma$  – частота прилипания электронов к молекулам воздуха (преимущественно к кислороду), величина, обратная среднему времени жизни электрон-ионных пар;  $\alpha$  и  $\beta$  – коэффициенты рекомбинации положительных ионов с электронами и отрицательными ионами соответственно.

Наиболее часто радиационные исследования проводят в зоне ионизации электронных ускорителей, где ионизация воздуха осуществляется электронным пучком.

Скорость ионообразования  $q$  можно найти, зная потери энергии релятивистских электронов на единице пути  $\frac{\partial E}{\partial x}$  [1], плотность тока пучка электронов  $j$  и энергию, необходимую для одной электрон-ионной пары  $W_e$  [2].

В области энергий от 1 до 10 МэВ (энергия типична для электронных ускорителей, используемых для радиационных исследований) ионизационные потери остаются неизменными и могут быть приняты равными  $1,6 \cdot 10^6$  эВ·см<sup>2</sup>·г<sup>-1</sup> [1; 2].

Примем плотность тока пучка ускорителя  $j = 10$  мА/см<sup>2</sup>, а энергию  $W_e = 34$  эВ. Получим для воздуха нормальной плотности  $q = 3,5 \cdot 10^{18}$  с<sup>-1</sup>·см<sup>-3</sup>.

Электрофизические свойства ионизированного газа определяются в основном поведением электронной компоненты, которая на четыре порядка более подвижна, чем ионная.

Процесс прилипания электронов к нейтральным молекулам воздуха при давлениях, близких к нормальному, протекает значительно быстрее электронной рекомбинации. Действительно, скорость прилипания определяется частотой прилипания  $\gamma$ , с<sup>-1</sup>, согласно экспериментальным исследованиям [3] при нормальном давлении равна  $1,1 \cdot 10^8$  с<sup>-1</sup> и зависит от давления согласно [4; 5]:

$$\gamma = 1,1 \cdot 10^8 \Phi^2 + 2,6 \cdot 10^6 \Phi,$$

где  $\Phi = P/P_0$ , здесь  $P_0$  – нормальное давление.

Состояние ионной компоненты будет определяться диссоциативной электрон-ионной рекомбинацией и трехчастичной рекомбинацией, когда избыточная энергия отдается третьей нейтральной частице, тогда коэффициент рекомбинации положительных ионов с электронами  $\alpha$  может быть принят согласно [5]:  $\alpha = (2,9 + 1,7\Phi) \cdot 10^{-7}$  см<sup>3</sup>·с<sup>-1</sup>.

Рекомбинация положительных ионов с отрицательными ионами может происходить в двойных и тройных соударениях, и коэффициент ион-ионной рекомбинации  $\beta \approx (5 \cdot 10^{-2} + 2,5\Phi) \cdot 10^{-6}$  см<sup>3</sup>·с<sup>-1</sup> [6; 5].

В работе [7] приведена подвижность электронов в воздухе в зависимости от давления, полученная экспериментально СВЧ-методами при измерении частоты соударения электронов с нейтральной компонентой и составляющая  $\mu_e = 2,6 \cdot 10^9 P^{-1,2}$  ед. СГСЭ, где  $P$  – давление воздуха, Торр.

Для нормального давления (760 Торр)  $\mu_e = 9,1 \cdot 10^5$  ед. СГСЭ.

Для стационарного случая концентрация электронов при плотности тока пучка  $j \approx 10$  мА·см<sup>-2</sup> составляет  $n = 3,3 \cdot 10^{10}$  см<sup>-3</sup> и проводимость воздуха определяется электронной компонентой  $\sigma = 1,4 \cdot 10^7$  ед. СГСЭ (с<sup>-1</sup>).

При решении ряда прикладных задач возникает необходимость расчета нестационарной проводимости воздуха (например, при исследовании переходных характеристик различных измерительных преобразователей, работающих в зоне ионизации радиационных установок). Нестационарная проводимость рассчитывается по формуле (1) с использованием системы (2).

Зададим скорость ионообразования с помощью функции Хевисайда в виде прямоугольного импульса длительностью  $10^{-6}$  с и временем задерживания  $10^{-7}$  с. Положим, что амплитуда импульса  $q_0 = 3,5 \cdot 10^{18}$  см<sup>-3</sup>·с<sup>-1</sup>.

Для положительных ионов подвижность  $\mu_{\text{ион}}^+$  примем равной  $4,2 \cdot 10^2$  ед. СГСЭ, аналогично для отрицательных ионов  $\mu_{\text{ион}}^- = 5,4 \cdot 10^2$  ед. СГСЭ [8].

На рис. 1–3 показаны результаты численного интегрирования системы (2).

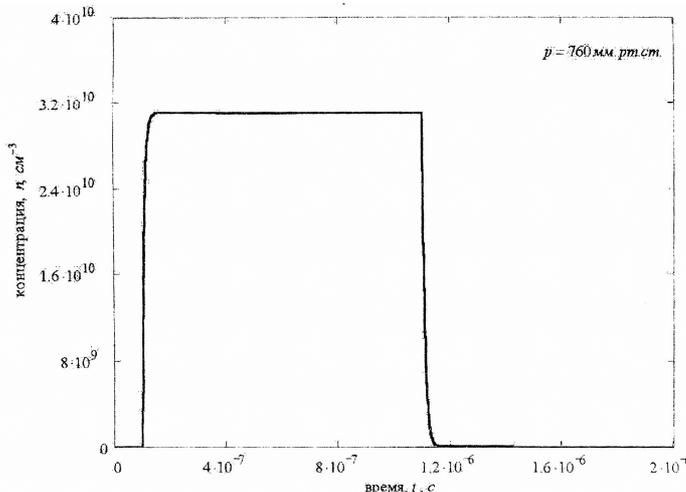


Рис. 1. Зависимость концентрации электронов от времени

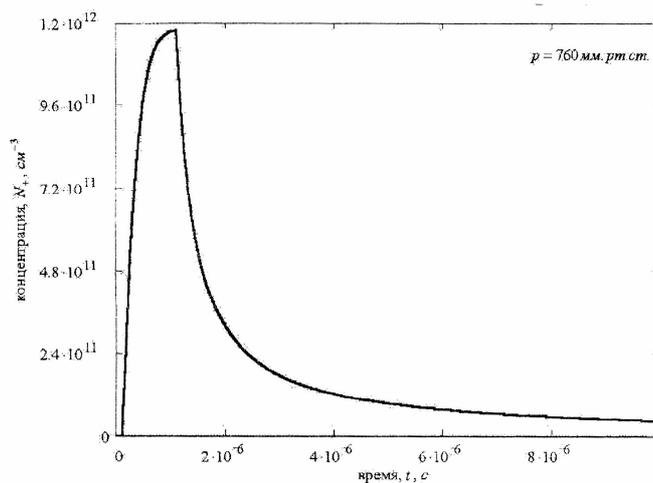


Рис. 2. Зависимость концентрации положительных ионов от времени

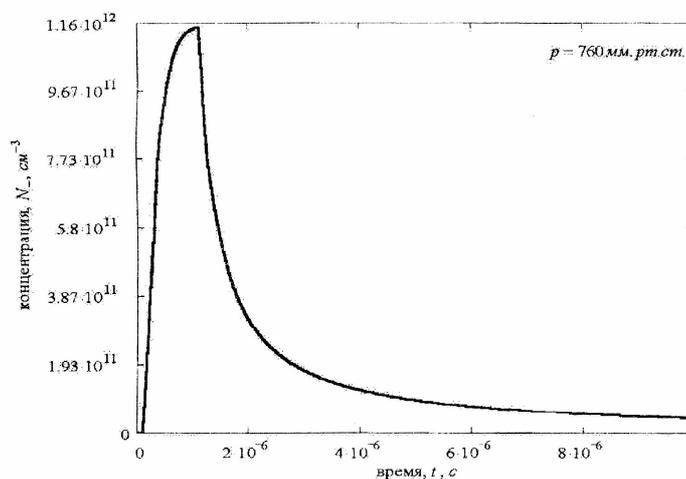


Рис. 3. Зависимость концентрации отрицательных ионов от времени

На рис. 4 показаны результаты численных расчетов нестационарной проводимости ионизированного воздуха с использованием формул (1) и (2).

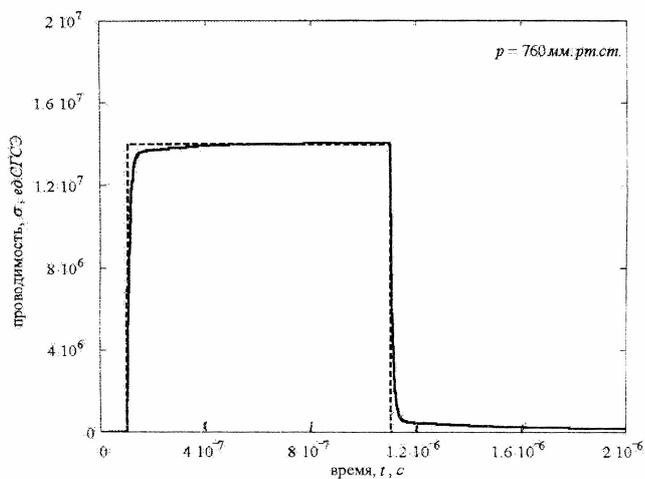


Рис. 4. Зависимость проводимости от времени при плотности тока пучка ускорителя электронов  $j = 10 \text{ мА} \cdot \text{см}^{-2}$

Из рис. 4 видно, что проводимость определяется поведением электронной компоненты и при этом практически повторяет форму пучка первичных электронов, таким образом, появляется возможность создания на этой основе методов измерения ионизационного эффекта.

Экспозиционная доза определена Рентгеном для атмосферного воздуха как стандартной среды, поэтому методы измерения проводимости могли бы стать основой импульсной дозиметрии высоких интенсивностей. Необходимо также отметить, что эти методы могли бы решить проблему зависимости чувствительности метода дозиметрии от энергии излучения ("хода с жесткостью"), что характерно для большинства методов, где в качестве первичного преобразователя используется среда, существенно отличающаяся от воздуха по атомному номеру. Эта проблема особенно остро стоит в дозиметрии однократных импульсов тормозного излучения, получаемых на сильноточных электронных ускорителях, где спектр излучения непостоянен от импульса к импульсу.

Преобладание электронной компоненты в проводимости воздуха позволяет при оценке ионизационного эффекта использовать лишь первое уравнение системы (2) и для квазистационарного случая (характерное время изменения потока радиации много больше  $10^{-8}$  с) полагать

$$q = \gamma n_e.$$

Если принять частоту прилипания  $\gamma$  известной [5], то скорость ионообразования однозначно определяется концентрацией электронов  $n_e$ , которая может быть определена экспериментально, например, одним из СВЧ-методов диагностики плазмы в пределах  $10^6$ – $10^{12}$  см<sup>-3</sup> [8].

### Вывод

Скорость ионообразования в воздухе известным образом [1; 2] связана с мощностью экспозиционной дозы, что позволяет получить высокоскоростные методы абсолютных измерений мощности экспозиционной дозы.

### Библиографический список

1. Голубев Б. П. Дозиметрия и защита от ионизирующих излучений. М. : Атомиздат, 1976. 503 с.
2. Иванов В. И. Курс дозиметрии. М. : Атомиздат, 1970. 326 с.
3. Кабанов Г. Л., Медведев Ю. А., Морозов Н. Н. Измерение времени жизни электронов в воздухе // Журнал технической физики. 1973. Т. 43. Вып. 6. С. 1275.
4. Марьяновская Л. Л., Медведев Ю. А. Вероятность прилипания электронов в воздухе при различных энергиях // Геомагнетизм и аэронавигация. Вып. 11. С. 75–78.
5. Медведев Ю. А., Степанов Б. М., Федорович Г. В. Ионизационно-рекомбинационные процессы в воздухе в потоке ионизирующего излучения // Вопросы метрологии ионизирующих излучений : сб. ст. М. : Атомиздат, 1976. С. 176–182.
6. Лабораторные исследования аэрокосмических реакций / под ред. А. Д. Данилова. Л. : Гидрометеиздат, 1970. 234 с.
7. Результаты исследования физических констант, характеризующих электрофизические свойства воздуха / Ю. П. Вагин, Ю. А. Медведев, Н. Н. Морозов, Б. Н. Степанов // Метрология быстро протекающих процессов. Труды ВНИИОФИ. М., 1977. С. 67–69.
8. Голант В. Е. Сверхвысокочастотные методы исследования плазмы. М. : Наука, 1968. 326 с.

### References

1. Golubev B. P. Dozimetriya i zaschita ot ioniziruyuschih izlucheny [Dosimetry and protection against ionizing radiation]. M. : Atomizdat, 1976. 503 p.
2. Ivanov V. I. Kurs dozimetrii [Dosimetry course]. M. : Atomizdat, 1970. 326 p.
3. Kabanov G. L., Medvedev Yu. A., Morozov N. N. Izmerenie vremeni zhizni elektronov v vozduhe [Measurement of time of electrons' life in air] // Zhurnal tehnikeskoj fiziki. 1973. V. 43. Vyp. 6. P. 1275.
4. Maryanovskaya L. L., Medvedev Yu. A. Veroyatnost prilipaniya elektronov v vozduhe pri pazlichnyh energiyah [The probability of electron trapping in the air at different energies] // Geomagnetizm i aeronomiya. 1971. Vyp. 11. P. 75–78.
5. Medvedev Yu. A., Stepanov B. M., Fedorovich G. V. Ionizatsionno-rekombinatsionnye protsessy v vozduhe v potoke ioniziruyushchego izlucheniya [Ionization and recombination processes in air in a stream of the ionizing radiations] // Voprosy metrologii ioniziruyuschih izlucheny : sb. st. M. : Atomizdat, 1976. P. 176–182.
6. Laboratornye issledovaniya aerokosmicheskikh reaktsiy [Laboratory researches of space reactions] / pod red. A. D. Danilova. L. : Gidrometeoizdat, 1970. 234 p.
7. Rezultaty issledovaniya fizicheskikh konstant, harakterizuyuschih elektrofizicheskie svoystva vozduha [Results of research of physical constants characterizing the electro-physical attributes of air] / Yu. P. Vagin,

Yu. A. Medvedev, N. N. Morozov, B. N. Stepanov // Metrologiya bystro protekayuschih protsessov. Trudy VNIIOFI. M., 1977. P. 67–69.

8. Golant V. E. Sverhvysochastotnye metody issledovaniya plazmy [Superhigh-frequency methods of research of plasma]. M. : Nauka, 1968. 326 p.

**Сведения об авторах**

**Гнатыук Виктор Степанович** – Мурманский государственный технический университет, факультет арктических технологий, кафедра общей и прикладной физики, д-р филос. наук, доцент; e-mail: polfiz@mstu.edu.ru

**Gnatyuk V. S.** – Murmansk State Technical University, Faculty of Arctic Technologies, Department of General and Applied Physics, Dr of Philos. Sci., Associate Professor; e-mail: polfiz@mstu.edu.ru

**Морозов Николай Николаевич** – Мурманский государственный технический университет, факультет арктических технологий, кафедра общей и прикладной физики, д-р техн. наук, профессор; e-mail: polfiz@mstu.edu.ru

**Morozov N. N.** – Murmansk State Technical University, Faculty of Arctic Technologies, Department of General and Applied Physics, Dr of Tech. Sci., Professor; e-mail: polfiz@mstu.edu.ru