

## A channeling of gas discharge

*A. Z. Efendiev, K. A. Efendiev*

Daghestan State University, Makhachkala, Russia

*The results of experimental research of multi-channel discharge, occurred in helium under the influence of spark radiation in the uniform field, when the strength in the gas interval is less than the strength of static breakdown, are represented. It is established that the origin of multi-channel discharge is caused by the field distortion by spatial charge of positive ions at cathode. The patterns of forming of spark channels in helium argon, air, nitrogen, elegas ( $SF_6$ ) are determined. It is done a review of works on channel formation of the gas discharges.*

УДК 533.523.3

## Экспериментальное исследование влияния расхода газа на импульсы тока отрицательной короны в аргоне

*Г.-Н. Б. Дандарон*

Восточно-Сибирский государственный технологический университет, г. Улан-Удэ, Россия

*Б. Б. Балданов*

Отдел физических проблем при Президиуме Бурятского научного центра СО РАН,  
г. Улан-Удэ, Россия

*Представлены результаты экспериментальных исследований влияния расхода газа на параметры импульсно-периодического режима отрицательной короны в потоке аргона. Установлено, что увеличение расхода газа вызывает увеличение длительности и изменение формы импульса тока отрицательной короны.*

Теоретические и экспериментальные исследования коронного разряда в основном проводятся в неподвижной газовой среде. Одним из актуальных направлений в изучении коронного разряда является исследование его характеристик в потоке газа, что имеет большое практическое значение в связи с разработкой различных газодинамических устройств (электрофилтры, плазмохимические реакторы и т. д.) [1, 2].

В начальных исследованиях отрицательной короны обнаружено, что регистрируемый электрический ток — не стационарная величина, а совокупность импульсов, которые следуют с определенной частотой (частотой Тричела) [3, 4]. Импульсно-периодический режим отрицательной короны (импульсы Тричела) в воздухе и различных газовых смесях является известным и достаточно изученным эффектом, но обобщение результатов на случай движущейся газовой среды представляет собой самостоятельную задачу [5—7]. В работах [8, 9] показано, что отрицательная корона в электроположительных газах ( $N_2$ , Ar) реализуется при слабой прокачке газа через разрядную камеру. Начальным этапом развития разряда в электроположительных газах является импульсно-периодический режим, который характеризуется регулярными импульсами тока, аналогичными импульсам Тричела в воздухе.

Малоисследованным, но универсальным эффектом является влияние потока газа в катодном слое короны на его параметры, в том числе на его устойчивость [10, 11]. Важность этого вопроса связана с ключевой ролью катодного слоя в функционировании разряда, так как установлено, что импульсы Тричела обусловлены не-

стационарностью тлеющего катодного слоя короны при малых токах короны [12, 13].

Целью данной работы является исследование импульсно-периодического режима отрицательной короны в аргоне и влияние на него потока газа.

### Экспериментальная техника и методика

© Дандарон Г.-Н. Б., Балданов Б. Б., 2007

Схема экспериментальной установки показана на рис. 1. Разрядная камера — это стеклянная колба в форме цилиндра с внутренним диаметром 18 см и высотой 22 см, в которой имеются две трубки диаметром 4 мм для ввода и вывода аргона. Катод-острие представляет собой вольфрамовый стержень с радиусом закругления вершины конуса  $r = 25$  мкм, плоский электрод в данной конфигурации электродов представляет собой стальную пластину (диаметром  $D = 3—15$  см).

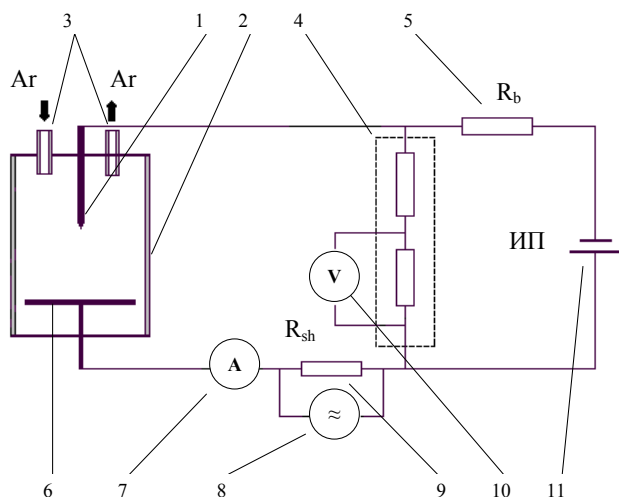


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:

1 — вольфрамовый стержень; 2 — разрядная камера; 3 — штуцера для ввода и вывода аргона; 4 — высоковольтный делитель; 5 — балластное сопротивление; 6 — стальная пластина; 7 — микроамперметр; 8 — электронный осциллограф; 9 — безынерционный шунт; 10 — вольтметр; 11 — источник питания

Электрическое питание коронного разряда осуществляется от выпрямительной установки ВС-20-10. Величина регулируемого напряжения  $U$  изменяется в пределах 0—20 кВ. Источник питания (ИП) подключается к электродам через балластное сопротивление  $R_b$ . Величина балластного сопротивления регулируется до 37 МОм.

В экспериментах использовался особо чистый аргон Ar (ГОСТ 10157—79), содержание примесей на уровне 0,01 %. Расход аргона  $G$  измеряется с помощью ротаметра РМ-А-0,16 ГУЗ до  $5 \cdot 10^{-5}$  кг/с.

Усредненный ток отрицательного коронного разряда измерялся стрелочным микроамперметром, а напряжение на разрядном промежутке — универсальным вольтметром с помощью калиброванного высоковольтного делителя при соотношении плеч 1:1000. Исследования формы, амплитуды и длительности импульсной компоненты тока и напряжения короны проводились с использованием малоиндуктивных токовых шунтов и двухлучевого осциллографа.

### Результаты эксперимента и их обсуждение

Исследование расхода газа  $G$  на параметры импульсно-периодического режима отрицательной короны проводилось путем спутного обдува коронирующего острия. Для выяснения особенностей развития разряда в потоке газа рассмотрим результаты эксперимента.

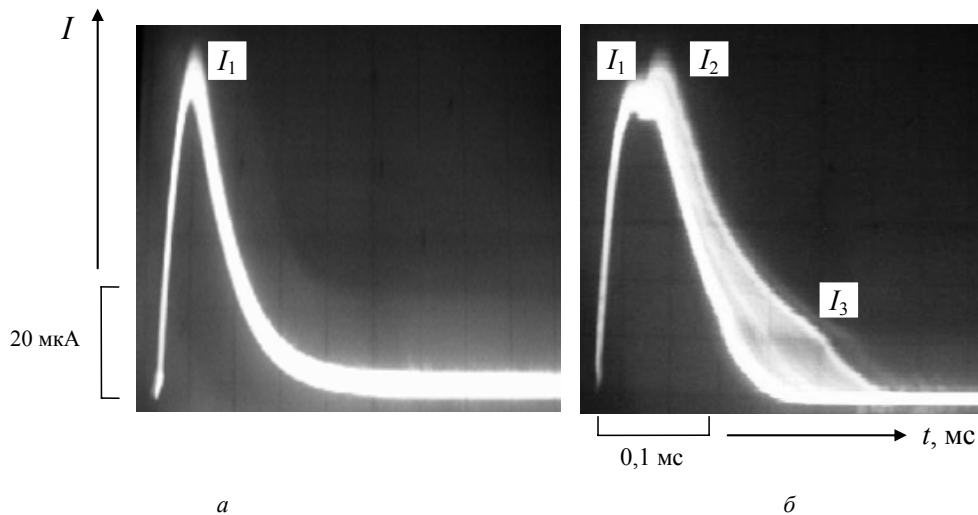
Осциллографирование разрядного тока в зависимости от расхода газа  $G$  показало, что при возникновении разряда ток короны распространяется в виде регулярных импульсов (импульсов Тричела). На рис. 2 представлены осциллограммы тока  $I$  отрицательной короны в спутном потоке аргона.

Импульс тока отрицательной короны состоит из двух частей (см. рис. 2, а); фронт импульса короткий по длительности  $\sim 5,5$  мкс и большой по амплитуде  $\sim 50$  мкА, спад импульса существенно больше по длительности. Первая часть, т. е. фронт импульса, очевидно, обусловлена током смещения  $I_1$  и длится до тех пор, пока волна ионизации не достигнет катода, после чего ток на катоде обеспечивается положительными ионами (ток проводимости  $I_2$ ) [14]. С ростом расхода газа  $G$  одновременно возрастает и усредненный ток отрицательной короны (рис. 3) [7, 15].

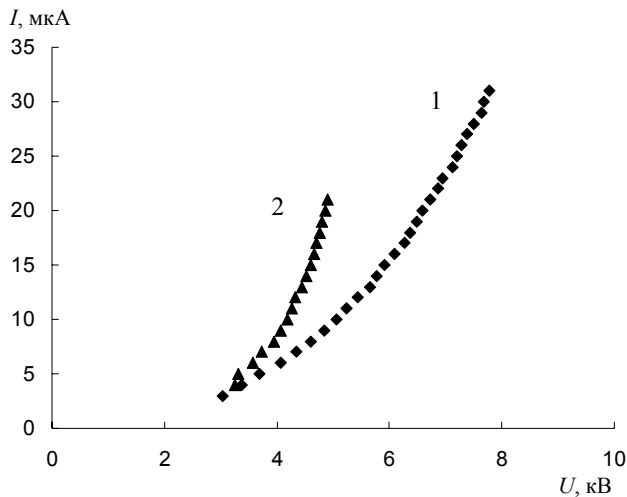
Представляет интерес более подробное рассмотрение динамики структуры заднего фронта импульса тока с увеличением расхода газа  $G$ . При расходах газа  $G > 2 \cdot 10^{-5}$  кг/с импульс тока характеризуется двумя максимумами —  $I_1$  и  $I_2$  (см. рис. 2, б). Когда ток смещения достигает максимума  $I_1$  (амплитуда тока смещения), наступает небольшой спад  $\sim 1$ —2 мкА, затем в течение 1—2 мкс ток возрастает на величину  $\sim 4$ —6 мкА, и, как показывает эксперимент, величина тока  $I_2$  (амплитуда тока проводимости) существенно зависит от расхода газа  $G$  (рис. 4).

Представленные результаты показывают, что с увеличением расхода газа  $G$  величина тока смещения  $I_1$  изменяется слабо и остается примерно постоянной, а именно  $\sim 50$  мкА, амплитуда  $I_2$  тока проводимости увеличивается, и при расходах газа  $G > 4 \cdot 10^{-5}$  кг/с амплитуда  $I_2$  превышает амплитуду  $I_1$  тока смещения.

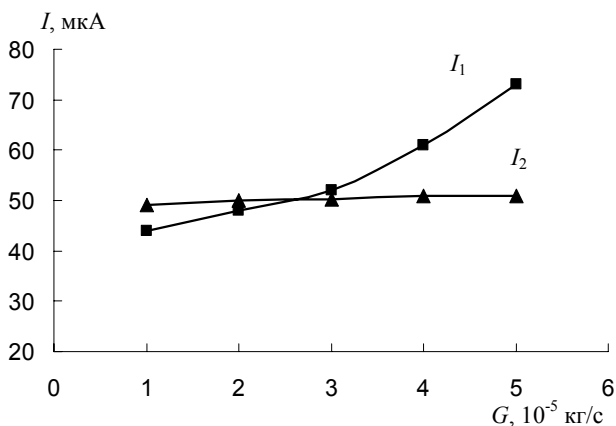
Достигнув максимума  $I_2$  (ток проводимости), ток резко уменьшается до некоторого критического значения —  $I_3 \sim 10$  мкА (см. рис. 2, б), а после перегиба ток в импульсе спадает (за несколько микросекунд) до величины 2—3 мкА и удерживается на таком уровне вплоть до начала развития следующего импульса. Как показывает эксперимент, при увеличении расхода газа  $G$  величина  $I \approx 10$ —14 мкА, когда наблюдается "горб" импульса тока, незначительно уменьшается.



**Рис. 2.** Осциллограммы импульсов тока отрицательной короны в потоке аргона при различных расходах газа  $G$ :  $I_1$  – амплитуда тока смещения;  $I_2$  – амплитуда тока проводимости;  $I_3$  – критический ток, при котором наблюдается выпуклость заднего фронта импульса тока.  
Межэлектродное расстояние  $d = 4$  см, напряжение  $U = 5,66$  кВ,  $t = 0,1$  мс/дел,  $I = 20$  мкА/дел.;  $a - G = 1 \cdot 10^{-5}$  кг/с;  $b - G = 4 \cdot 10^{-5}$  кг/с



**Рис. 3.** Зависимость вольт-амперной характеристики отрицательной короны в аргоне от расхода газа  $G$ .  
Межэлектродное расстояние  $d = 2$  см; расход газа  $G$ :  
1 —  $1 \cdot 10^{-5}$  кг/с; 2 —  $4 \cdot 10^{-5}$  кг/с



**Рис. 4.** Зависимость амплитуды тока смещения  $I_1$  и тока проводимости  $I_2$  от расхода газа  $G$

В коронирующей системе острие—плоскость с малым межэлектродным промежутком ( $< 5$  см) не удается поддерживать коронный разряд в неподвижной газовой среде из-за быстрого перехода коронного разряда в искровой. В то же время при слабой прокачке газа через разрядную камеру ( $G \sim 10^{-5}$  кг/с) реализуется устойчивый импульсно-периодический режим отрицательной короны.

#### Выводы

1. При постоянном напряжении  $U$  с увеличением расхода газа  $G$  одновременно возрастает осредненный ток отрицательной короны.
2. Характеристики импульсов тока отрицательной короны в потоке аргона (форма импульса, амплитуда и частота) при расходах газа  $G > 2 \cdot 10^{-5}$  кг/с существенно отличаются от импульсов тока при меньших  $G < 2 \cdot 10^{-5}$  кг/с.
3. Амплитуда  $I_2$  тока проводимости превышает амплитуду тока  $I_1$  смещения с увеличением расхода газа  $G$ , в то время как амплитуда  $I_2$  тока смещения изменяется слабо.

#### Л и т е р а т у р а

1. Катцов Н. А. Коронный разряд и его применение в электрофильтрах. — М.: Гостехиздат, 1947.
2. Верещин И. П. Коронный разряд в аппаратах электронной технологии. — М.: Энергоатомиздат, 1985.
3. Trichel G. W. // Phys. Rev, 1938. V. 54, P. 1078.
4. Loeb L. B. Electrical coronas // Univ. of California Press, 1965.
5. Ватажин А. Б., Грабовский В. И. // Изв. АН СССР. МЖГ. 1983. № 3. С. 133.
6. Варенцов О. К., Ватажин А. Б., Фармазян В. В. // Изв. АН СССР. МЖГ, 1986. № 1. С. 153.
7. Ватажин А. Б., Лихтер В. А., Шульгин В. И. // ТВТ, 1991. Т. 29. Вып. 1. С. 1.

8. Акишев Ю. С., Грушин М. Е., Каральник В. Б., Трушкин Н. И. // Физика плазмы, 2001. Т. 27. № 6. С. 550.
9. Дандарон Г.-Н. Б., Балданов Б. Б., Базарсадаев Б. Ц. // Тр. IV Междунар. науч. конф. "Радиационно-термические эффекты и процессы в неорганических материалах". — Томск: Изд-во ТПУ, 2004. С. 366.
10. Смирнов С. А., Баранов Г. А. // ЖТФ, 2001. Т. 71. Вып. 7. С. 30.
11. Смирнов С. А., Баранов Г. А. // Там же. С. 39.
12. Napartovich A. P., Akishev Yu. S., Derygin A. A., Kochetov I. V., Pankin M. V., Trushkin N. I. // J. Phys. D.: Appl. Phys., 1997. V. 30. P. 2726.
13. Акишев Ю. С., Грушин М. Е., Кочетов И. В., Напартович А. П., Трушкин Н. И. // Физика плазмы, 1999. Т. 25. № 11. С. 998.
14. Акишев Ю. С., Дерюгин А. А., Кочетов И. В., Напартович А. П., Панькин М. В., Трушкин Н. И. // Письма в ЖТФ, 1996. Т. 22. Вып. 22. С. 1.
15. Ватажин А. Б., Грабовский В. И., Лихтер В. А., Шульгин В. И. Электрогазодинамические течения. — М.: Наука, 1983.

Статья поступила в редакцию 10 июля 2006 г.

## Experimental research of a gas stream influence on pulses of a negative corona current in argon

G.-N. B. Dandaron

The East-Siberian State Technological University, Ulan-Ude, Russia

B. B. Baldanov

The Department of Physical problems at Presidium of the Buryat Scientific Centre of the Siberian Branch of the Russian Academy of Science, Ulan-Ude, Russia

*In this paper we present the results of experimental research of a gas stream influence on the parameters of a periodic mode of a negative corona in a stream of argon. It is established, that the increase of a gas stream causes increase in duration and change of the form current pulse a of a negative corona.*

УДК 533.9.082

## Исследование механизмов генерации рентгеновского излучения в плазме тяжелых элементов зет-пинчевого разряда

А. Н. Долгов, В. К. Ляпидевский, А. С. Савелов, Г. Х. Салахутдинов

Московский инженерно-физический институт (Государственный университет), Россия

*Представлены результаты прямых измерений параметров рентгеновского излучения, а также модельных расчетов, выполненных на основе регистрируемого в экспериментах спектра электронной эмиссии, из плазмы быстрого зет-пинча в среде тяжелых элементов.*

Интерес к быстрым зет-пинчам в среде тяжелых элементов связан с появлением в них плотной  $n_e > 10^{19}$  см<sup>-3</sup> горячей  $T_e \sim 1$  кэВ многократно ионизованной плазмы, служащей эффективным источником вакуумного ультрафиолетового и мягкого рентгеновского излучения высокой мощности.

Размеры области горячей плотной плазмы, получившей в литературе названия "горячей точки", "плазменной точки" или микропинча, могут достигать нескольких микрометров, приближаясь по величине к микроскопическому параметру плазмы разряда — лар-