

03;04;12

## Некоторые особенности коронного разряда в воздухе

© С.Б. Афанасьев, Д.С. Лавренюк, И.Н. Петрушенко, Ю.К. Стишков

Санкт-Петербургский государственный университет,  
198504 Санкт-Петербург, Россия  
e-mail: afanasb@mail.ru, asb@niirf.spbu.ru, Stishkov@paloma.spbu.ru

(Поступило в Редакцию 1 августа 2007 года)

Представлены результаты разностороннего экспериментального исследования особенностей положительного и отрицательного коронного разряда и сопутствующих ему процессов. В результате исследований выявлены и описаны некоторые особенности коронного разряда в воздухе при атмосферном давлении и показана их взаимосвязь с электрическим ветром.

PACS: 52.80.Nc

### Введение

Коронный разряд всегда исследовался с трех разных точек зрения: во-первых, как физическое явление, во-вторых, как нежелательный эффект в высоковольтном оборудовании, в-третьих, как явление, используемое в ряде технологических процессов.

Первые практические исследования коронного разряда проводились с целью его устранения как нежелательного явления в высоковольтном электрооборудовании. При этом основное внимание акцентировалось на условиях зажигания коронного разряда и на разработке методов его предотвращения. Достаточно подробно этот вопрос был освещен еще в начале 20-го в. [1].

В настоящее время наиболее интенсивно развивается применение коронного разряда в технике. Уже традиционным стало его применение в газоочистке, сепарации, электроокраске, нанесении покрытий, модифицировании свойств поверхности и многих других направлениях. Практическое применение коронного разряда подробно описывается как в работах уже ставших классическими [2], так и в новых публикациях [3]. Как физическое явление коронный разряд рассматривался в качестве одной из форм разряда в газе [1,4,5]. В современных работах [3,6] описываются интересные экспериментальные явления, связанные с коронным разрядом. Но они носят узконаправленный прикладной характер.

Настоящая работа содержит результаты разностороннего экспериментального исследования коронного разряда и сопутствующих ему процессов.

### Экспериментальная установка

Исследование коронного разряда производилось в системе электродов „игла–плоскость“. Это система с сильно неоднородным электрическим полем, ее использование позволяет существенно разделить напряжение зажигания коронного разряда и напряжение искрового пробоя [1].

Система электродов устанавливалась в герметичной кювете (рис. 1), что позволяло производить исследова-

вание коронного разряда при различных давлениях. Эксперименты по исследованию коронного разряда проводились с одновременной регистрацией вольт-амперных характеристик (ВАХ) и видео- или фото-съемкой. Съемка производилась двумя видеокамерами высокой чувствительности с различным увеличением, что позволило одновременно регистрировать ближнюю зону коронного разряда и весь межэлектродный промежуток. Для синхронизации видеоряда и осциллограмм использовался „синхроимпульс“, подаваемый на вход аналого-цифрового преобразователя (АЦП) и светодиод, расположенный в поле видимости видеокамер.

Обработка экспериментальных данных проводилась в среде MatLab (The MathWork, Inc.), где были написаны специальные процедуры, позволяющие производить обработку данных и их визуализацию. Помимо этого использовалась автоматическая фильтрация и/или усреднение экспериментальных данных.

### Экспериментальные результаты

#### Отрицательное напряжение

Анализ видеок кадров короны показал, что чехол короны в диапазоне напряжений 5–13 кВ имеет шарообразную форму, размеры короны монотонно увеличиваются с ростом напряжения. При более высоких напряжениях форма коронного разряда изменяется и приобретает специфические очертания (рис. 2).

Одновременно с экспериментом проводилось численное моделирование электрического поля в системе „игла над плоскостью“, размеры которой соответствовали использованному в эксперименте. После проведения расчетов область чехла короны определялась из условия: электрон  $e$  на длине свободного пробега  $l$  в электростатическом поле  $E$  набирает энергию ( $W_i = eEl$ ), достаточную для ионизации молекул воздуха ( $W_i \approx 14 \text{ eV}$ ), что соответствует электрическим полям напряженностью более чем 25 кВ/см. На рис. 3 темным тоном выделена область локализации чехла коронного разряда.

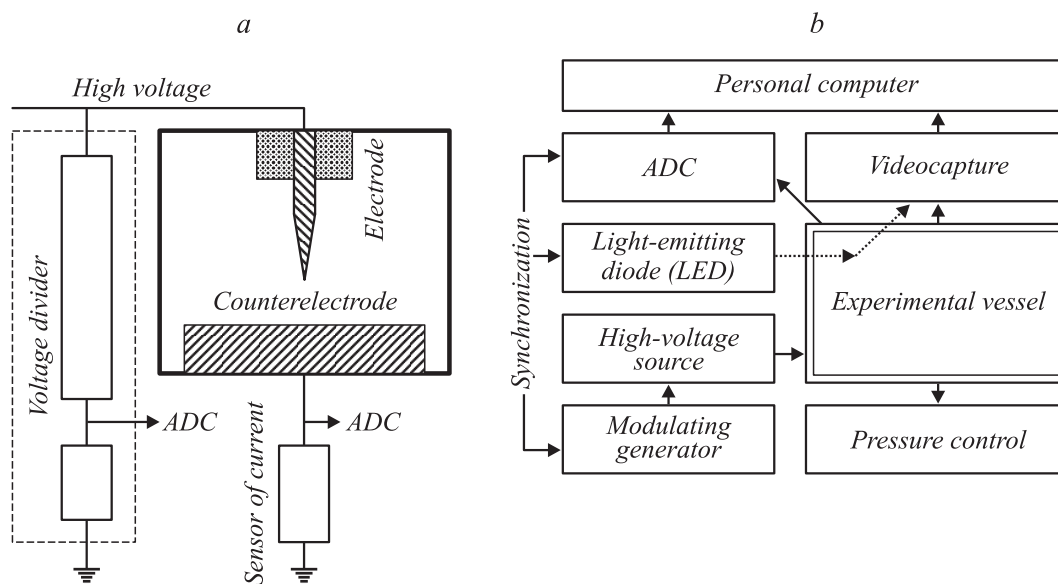


Рис. 1. *a* — схема экспериментальной кюветы, *b* — блок-схема экспериментальной установки.

Видно, что с момента зажигания коронного разряда наблюдаются как качественное, так и количественное отличия ближней зоны от рассчитанной в электростатическом приближении.

При напряжениях, близких к порогу зажигания коронного разряда, ближняя зона концентрируется у острия иглы. По мере увеличения подаваемого напряжения наряду с чехлом короны (рис. 2) появляется диффузное свечение во всей межэлектродной области (рис. 4). Сначала регистрируется диффузное свечение в объеме у поверхности противозэлектрода. При дальнейшем повышении напряжения увеличивается яркость объемного диффузного свечения, и свечение регистрируется уже по всей длине межэлектродного промежутка.

Регистрация межэлектродного диффузного свечения на фоне яркого свечения ближней зоны коронного разряда возможна только при существенном увеличении напряжения (в четыре раза выше напряжения зажигания коронного разряда).

Расчетные области облегают электрод, и по мере роста напряжения область чехла должна подниматься по игле. В эксперименте (рис. 2, *c, d*) чехол короны принимает треугольную пикообразную форму с вытянутыми углами, область его локализации существенно отличается от рассчитанной.

Отметим следующие особенности наблюдаемого явления.

1. Увеличение интенсивности межэлектродного свечения происходит достаточно быстро, но плавно, без скачка.

2. Несмотря на то что ионизованный газ занимает весь межэлектродный промежуток, это не приводит к формированию стримерного канала, искровой пробой не наблюдается.

3. ВАХ коронного разряда имеет монотонно возрастающий вид и не содержит изломов или скачков.

Наблюдаемые нами эффекты говорят о несовпадении зон ионизации и рекомбинации. При рассмотрении движения только ионов относительно неподвижной среды это невозможно, поскольку возникающие в зоне ионизации ионы и электроны под действием электрического поля движутся в различные стороны, не пересекаясь друг с другом. Электроны быстро уходят за пределы

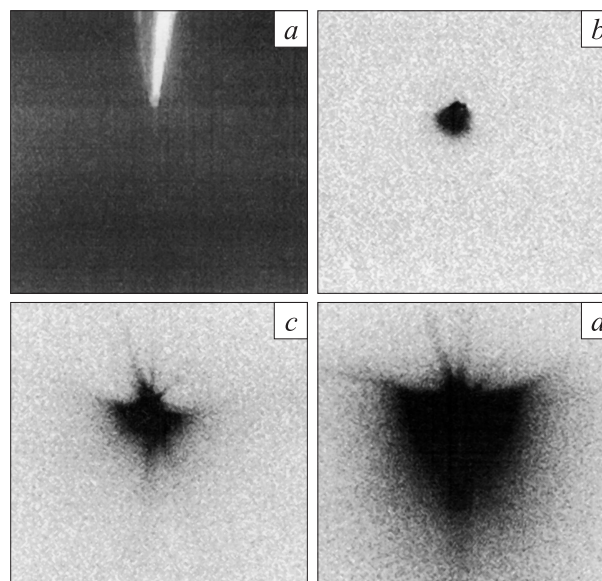
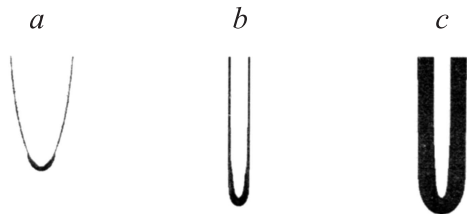
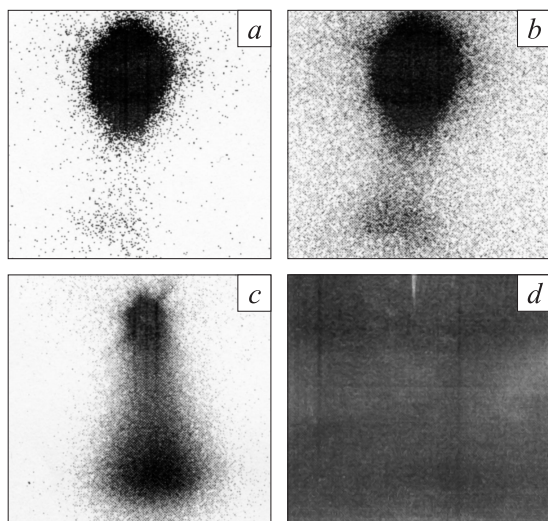


Рис. 2. Фотографии коронного разряда (напряжение зажигания коронного разряда составляет 4 кВ): *a* — фотография электрода, *b-d* — негативы фотографий коронного разряда: *b* — 4.7, 2, *c* — 12.1 кВ, 29  $\mu$ А, *d* — пикообразная форма короны — 16.5 кВ, 66  $\mu$ А.



**Рис. 3.** Ближняя зона коронного разряда, рассчитанная в электростатическом приближении. Черным цветом выделена область с напряженностью выше 25 кВ, в которой возможно лавинное размножение электронов: *a* — напряжение 1 кВ (относительно других рисунков увеличен в 5 раз), *b* — 4, *c* — 10 кВ.



**Рис. 4.** Снос ионизированного газа в межэлектродный промежуток. Негативы фотографий коронного разряда представлены после незначительной обработки, для „выделения“ свечения в межэлектродном промежутке. Кадры получены при разных напряжениях: *a* — 15,8, 55, *b* — 16,1, 58, *c* — 16,5 кВ, 66 мкА, *d* — фотография кюветы без коронного разряда (для сравнения).

зоны ионизации, положительные ионы уходят на игольчатый электрод и не могут вызвать рекомбинационного свечения вне пределов зоны ионизации. Несовпадение зон ионизации и рекомбинации может быть объяснено исключительно гидродинамическим движением среды как целого.

При появлении униполярного коронного разряда во внешней зоне образуется объемный заряд знака потенциала острия, который вызывает электрический ветер.

Нами были проведены отдельные эксперименты, которые показали, что появление короны сопровождается появлением электрического ветра достаточно высокой скорости: до нескольких метров в секунду. Возникающий электрический ветер выносит ионизированный газ в межэлектродный промежуток.

В пользу приведенной гипотезы говорит еще и следующий факт, что у противоположного электрода наблюдается расширение светящейся области, сопровождающееся увеличением яркости свечения. Это можно объяснить следующим образом: при столкновении с противоположным электродом происходит гидродинамическое растекание струи, сопровождаемое существенным замедлением скорости потока, а следовательно, увеличением времени прохождения потока ионизированного газа. В результате увеличивается интенсивность рекомбинационного свечения.

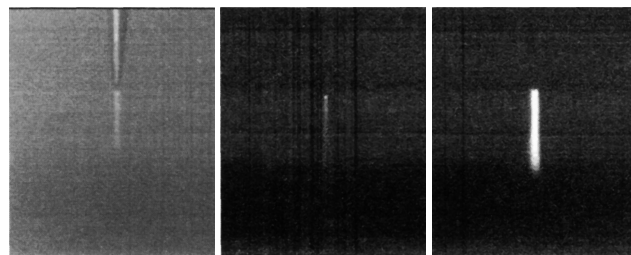
### Положительное напряжение

При подаче положительного напряжения наблюдаются три различных фазы горения коронного разряда. Отметим, что в отличие от отрицательной полярности устойчиво регистрируется дискретный переход между различными фазами разряда. Эксперименты с положительным напряжением проводились в тех же условиях: диапазоне напряжений — до 20 кВ и давления — от 0,5 до 1 атм.

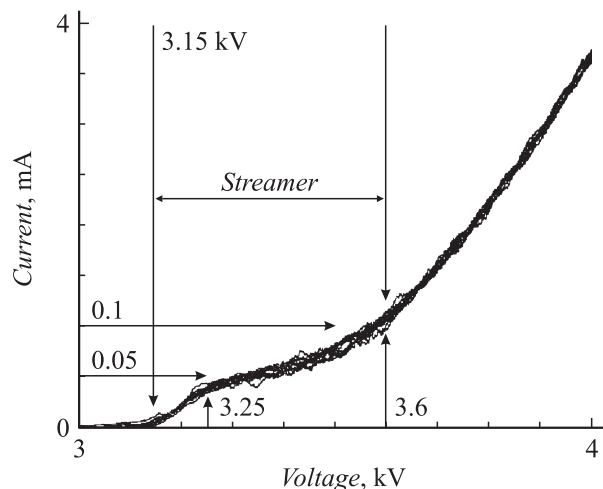
#### Фаза № 1. Первичная стримерная форма

При напряжениях, незначительно превышающих напряжение зажигания коронного разряда, наблюдается особая форма горения коронного разряда. Отметим, что она не связана с переходными процессами и наблюдается при подаче медленно сменяющегося постоянного напряжения. Данная стадия получила рабочее название „первичная стримерная форма“. Этой форме соответствует горение короткого стримерного канала, локализованного у острия иглы. В наших экспериментах длина стримера составляла около 2 мм, при длине межэлектродного промежутка 10,5 мм (рис. 5). Данной фазе горения разряда соответствует начальный слабоизменяющийся участок ВАХ (рис. 6).

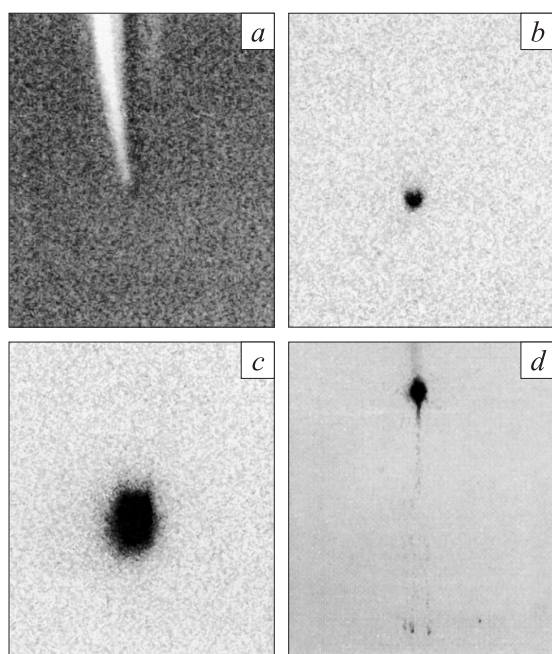
Для различных образцов электрода существенно различаются как интервалы напряжений, при которых наблюдается данная форма, так и соответствующие токи (наблюдались такие соотношения: интервал напряжений от 0,1 кВ с током насыщения 0,05–0,1 мкА до интервала напряжений 0,5 кВ с током насыщения 1 мкА).



**Рис. 5.** Фотографии коронного разряда в фазе первичной стримерной формы, сделанные при различной освещенности и размере диафрагмы.



**Рис. 6.** ВАХ коронного разряда в первичной стримерной форме, зажигание коронного разряда происходит при напряжении 3.15 kV. ВАХ содержит два характерных участка: участок 3.15–3.25 kV — фронт первичной стримерной формы, участок 3.25–3.6 kV — насыщение по току первичной стримерной формы.



**Рис. 7.** Динамика развития ближней зоны коронного разряда при положительной полярности: *a* — фотография иглы, *b–d* — негативы фотографии положительной короны: *b* — 3.4, 0.4, *c* — 6.2 kV, 3.5  $\mu$ A, *d* — появление стримера — 9.3 kV, 10.0  $\mu$ A.

### Фаза № 2. Облегающая лавинная форма

После переходной фазы наблюдается лавинная форма коронного разряда, но в отличие от отрицательной полярности локализация ближней зоны значительно больше соответствует рассчитанной в электростатическом

приближении (рис. 3). Динамику изменения формы короны при росте напряжения иллюстрируют фотографии, представленные на рис. 7.

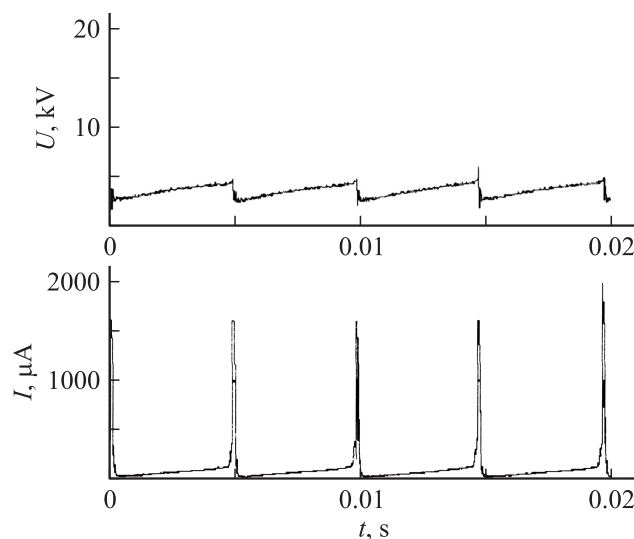
Виден рост размеров чехла коронного разряда (рис. 7, *b, c*) и образование стримерного канала (рис. 7, *d*). Наблюдаемое различие в размерах ближней зоны может быть объяснено следующим образом.

Предполагаем, что отличие рассчитанных значений от экспериментальных данных обусловлено наличием объемного заряда, который приводит к увеличению зоны ионизации. Это происходит из-за того, что объемный заряд „сглаживает“ спад напряженности и поэтому поле ослабевает до критических значений на большем расстоянии.

### Фаза № 3. Канальная контрагированная форма

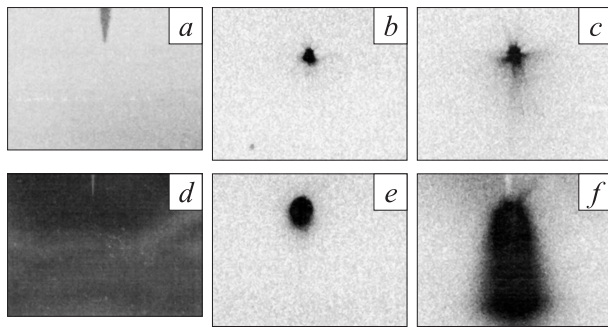
В системе электродов „игла–плоскость“ зафиксирована еще одна форма — контрагированная форма разряда, возникающая при положительной полярности иглы. Контрагированная форма разряда не сопровождалась искровым пробоем межэлектродного промежутка.

При увеличении подаваемой мощности происходит переход к следующей фазе — к контрагированному разряду. При этом происходит существенный рост тока при незначительном повышении напряжения. Можно говорить о вольт-амперной характеристике, близкой к так называемой S-образной форме. При этом возникает бегающий контрагированный канал, перемыкающий межэлектродный промежуток. Предположительно происходит стримерный пробой межэлектродного промежутка (рис. 7, *d*), не переходящий в лидерный из-за недостаточной выходной мощности источника напряжения. Соответствующие осциллограммы тока представлены на рис. 8.

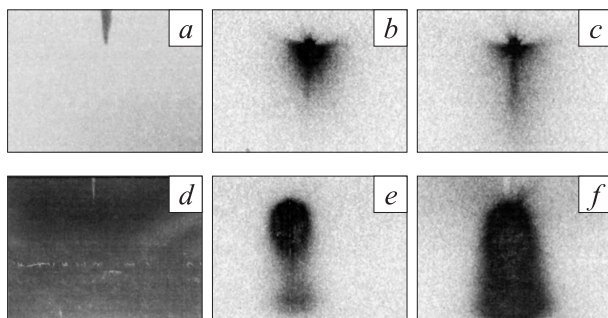


**Рис. 8.** Осциллограммы контрагированной формы разряда в системе „игла–плоскость“ при межэлектродном расстоянии 7.5 mm.





**Рис. 9.** Коронный разряд при фиксированном отрицательном напряжении (10 kV), для разных давлений: *a* — фотография кюветы, *b* — негатив фотографии короны при атмосферном давлении, 19  $\mu\text{A}$ , *c* — негатив фотографии короны при давлении 0.6 atm., ток 60  $\mu\text{A}$ , *d-f* — соответствующие кадры, сделанные камерой с меньшим увеличением. На кадре *f* видно диффузное свечение во всем межэлектродном промежутке.



**Рис. 10.** Коронный разряд при фиксированном токе (55  $\mu\text{A}$ ), при различных давлениях, *a* — фотография кюветы, *b* — негатив фотографии короны при давлении 0.9 atm., 14.5 kV, *c* — негатив фотографии короны при давлении 0.6 atm., 12.3 kV, *d-f* — соответствующие кадры, сделанные камерой с меньшим увеличением.

Видно, что после стримерного пробоя происходит постепенная зарядка конденсаторов источника напряжения до наступления следующего пробоя и т. д. Картина носит периодический характер (рис. 8).

В контрагированной форме разряд определяется не только системой электродов — на первый план выходят параметры внешней цепи.

### Влияние давления на горение коронного разряда

При изменении давления в диапазоне 0.5–1.0 atm качественных изменений не наблюдается. Изменения носят количественный характер. Так, при изменении давления изменяются значения напряжений, при которых наблюдаются качественные изменения в эволюции коронного разряда, описанные выше. Таким образом, изменяя давление при фиксированном напряжении (рис. 9) или токе (рис. 10), мы можем получить различные картины коронного разряда. Особенно хорошо это видно при фиксированном напряжении (рис. 9).

По кадрам с фиксированным током (рис. 10) видно, что по мере уменьшения давления увеличивается вклад, вносимый электрическим ветром. Об этом свидетельствует изменение формы свечения у электрода, а также значительное увеличение яркости диффузного свечения в межэлектродном промежутке.

Следует отметить, что новые качественные изменения в форме горения коронного разряда, например переход к тлеющему разряду, возможно только при более существенных изменениях давления. Сравнивая формы коронного разряда, при положительной и отрицательной полярностях игольчатого электрода следует отметить их существенные различия.

### Выводы

1. Проведено комплексное экспериментальное исследование коронного разряда в системе „игла–плоскость“ при положительном и отрицательном напряжениях на игле.
2. Зарегистрированы и описаны пикообразная форма зоны рекомбинационного свечения отрицательной короны и появление диффузного свечения дальней зоны.
3. Зарегистрировано существенное отличие между зоной ионизации и зоной рекомбинационного свечения, отрицательной короны.
4. Выявлена определяющая роль электрического ветра в изменении формы зоны рекомбинационного свечения отрицательной короны и появлении диффузного свечения межэлектродного свечения. Причиной появления свечения в дальней зоне является снос ионизованного газа электрическим ветром из чехла короны в межэлектродный промежуток.
5. Зарегистрирована и описана первичная стримерная форма горения положительной короны. Она наблюдается в виде короткого стримера у коронирующего электрода, не замыкающего межэлектродный промежуток, и характерной первичной „ступенькой“ на вольт-амперной характеристике.

### Список литературы

- [1] Peek F.W., jr. Dielectric phenomena in high-voltage engineering. London: McGRAW-HILL Book Company, 1929.
- [2] Верещагин И.П. Коронный разряд в аппаратах электронно-ионной технологии. М.: Энергоатомиздат, 1985.
- [3] Козлов Б.А., Соловьев В.И. // ЖТФ. 2006. Т. 76. Вып. 7. С. 1–7.
- [4] Райзер Ю.П. Физика газового разряда. М.: Наука; Гл. ред. физ.-мат. лит., 1992.
- [5] Голубовский Ю.Б., Кудрявцев А.А., Некучаев В.О., Порохова И.А., Цендин Л.Д. Кинетика электронов в неравновесной газоразрядной плазме. СПб: Изд-во СПбГУ, 2004.
- [6] Орешко А.Г. // XXX Звенигородская конф. по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу. Московская область, Звенигород, 24–28 февраля 2003. М.: Московский авиационный институт, 2003.