

# ИССЛЕДОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНЫХ МОД В ИГЛА-ПЛОСКОСТЬ ГАЗОВОМ РАЗРЯДЕ ПРИ АТМОСФЕРНОМ ДАВЛЕНИИ В РАЗЛИЧНЫХ $N_2 - O_2$ СМЕСЯХ

*В.И. Голота, Л.М. Завада, Б.Б. Кадолин, В.И. Карась, И.А. Пащенко, С.Г. Пугач, А.В. Яковлев*

*Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт»,  
Ул. Академическая 1, Харьков, 61108, Украина*

Проводится анализ экспериментальных исследований токовой динамики и динамики излучения в нестационарном разряде атмосферного давления в системе электродов игла-плоскость в сухом воздухе, лабораторном воздухе и в обогащенном кислороде.

PACS: 12.20.-m, 13.40.-f, 13.60-Nb, 13.88.+e

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Газовый разряд высокого давления в системе электродов игла-плоскость интенсивно исследуется в последнее время с целью использования его в плазмохимических реакторах синтеза озона. Известно, что для коротких разрядных промежутков с сильно неоднородным электрическим полем в кислородсодержащих газах атмосферного давления существует несколько режимов горения разряда. При повышении напряжения для заданной электродной геометрии реализуется сначала стационарный режим, а затем различные режимы нестационарного протекания тока через разрядный промежуток. Существование данных режимов горения разряда обусловлено различием физико-химических процессов характерных для этих режимов. Стационарный режим протекания тока (положительная корона) является наиболее простым для изучения, однако он малоэффективен для синтеза озона [1]. При повышении напряжения увеличивается скорость ионизационных процессов в области сильного электрического поля, сформированного острым электродом, что приводит к росту плотности носителей заряда в этой области. В результате чего создаются условия для выполнения критерия лавинно-стримерного перехода и возникновения нестационарного режима горения разряда (стримерная корона, нестационарный стримерный разряд). В этом режиме генерация озона происходит с эффективностью не хуже, чем в барьерном разряде. Однако многие физические процессы в нестационарном режиме горения разряда до сих пор недостаточно изучены и остаются без ответа.

Целью данной работы является исследование нестационарных режимов горения разряда при атмосферном давлении в системе электродов игла-плоскость. Проводилось сравнение мгновенных значений токового сигнала и излучения из разных областей разрядного промежутка для кислород-содержащих газовых смесей (сухой воздух, лабораторный воздух, обогащенный кислород).

## 2. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

Принципиальная схема экспериментальной установки представлена на рис.1. Электродная система типа игла-плоскость с межэлектродным расстоянием  $d$  (от 6 мм до 13 мм) располагалась в разрядной

камере (объем 1 дм<sup>3</sup>). Через разрядную камеру была возможность прокачивать следующие газы: лабораторный воздух, сухой воздух, смесь кислорода с азотом в процентном соотношении 95%  $O_2$  и 5%  $N_2$ .

К острейшему электроду прикладывалось постоянное высоковольтное напряжение положительной полярности в диапазоне от 3 до 15 кВ.

Для регистрации излучения газового разряда в камере имелась оптическая щель герметично закрытая кварцевым стеклом. Передвигая щель вдоль разрядного промежутка от анода к катоду с шагом 1 мм, исследовалась пространственная динамика излучения разряда.

После прохождения оптической щели излучение разряда фокусировалось кварцевым конденсором на входную щель монохроматора МДР-12У. С помощью монохроматора из спектра излучения разряда вырезалась наиболее интенсивная линия II положительной системы азота (337нм). Затем излучение регистрировалось ФЭУ-39А. Диноды ФЭУ зашунтированы высокочастотными конденсаторами для корректного измерения коротких световых импульсов.

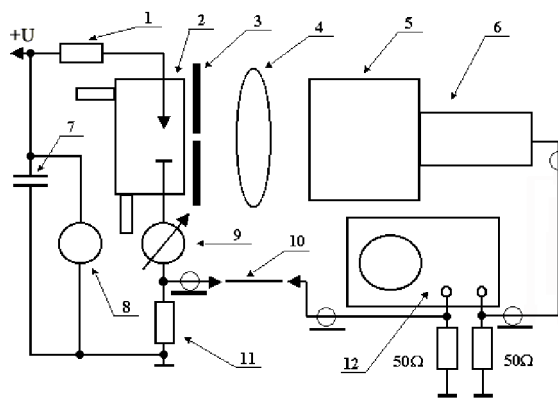


Рис. 1. Схема экспериментальной установки. 1 – балластный резистор 100 к $\Omega$ , 2 – разрядная камера, 3 – оптическая щель, 4 – конденсор, 5 – монохроматор МДР-12У, 6 – ФЭУ-39А, 7 – емкостной фильтр напряжения, 8 – киловольтметр С 196, 9 – микроамперметр Ф 195, 10 – 75 нс линия задержки, 11 – шунт, 12 – двухканальный осциллограф Tektronix TDS-210

Токовые импульсы с ФЭУ измерялись с помощью безиндуктивного шунта 50 Ом и подавались на первый канал двухканального осциллографа

Tektronix TDS-210. На второй канал осциллографа подавался импульс разрядного тока с высокочастотного токового шунта, который подключался последовательно с электродной системой. Для согласования сигналов по времени, сигнал с токового шунта проходил по линии задержки 75 нс.

### 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

По осциллограммам сигналов тока и излучения из различных областей разрядного промежутка была исследована структура и динамика токового импульса в сухом воздухе, лабораторном воздухе и в обогащенном кислороде. При этом контролировалось высоковольтное напряжение, приложенное к разрядному промежутку  $U$  и средний ток разряда  $I_{cp}$ .

Осциллограммы токовых импульсов с различным временным разрешением для лабораторного воздуха представлены на рис.2.

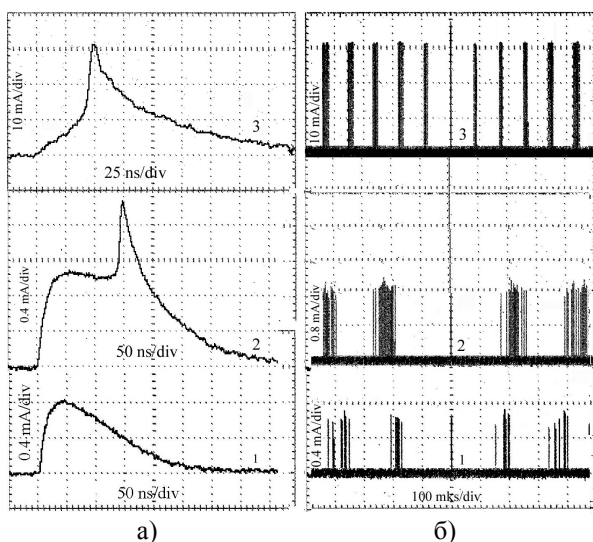


Рис. 2. Осциллограммы отдельных импульсов тока разряда (а) и последовательности токовых импульсов (б) в системе электродов игла-плоскость для лабораторного воздуха ( $d=11$  мм). 1 -  $U=6$  кВ,  $I_{cp}=3.5$  мкА; 2 -  $U=6.4$  кВ,  $I_{cp}=4.2$  мкА; 3 -  $U=11$  кВ,  $I_{cp}=50$  мкА

Видно, что ток разряда в нестационарном режиме горения имеет ярко выраженный квазипериодический характер. При этом с увеличением напряжения изменяется как частота следования токовых импульсов, так и амплитуда и длительность отдельного токового импульса. Появление на фоне постоянной составляющей тока токовых импульсов с одним пиком и установление квазипериодического режима следования импульсов соответствует переходу к нестационарному режиму протекания тока (см. рис.2,а осциллограмма (1)). С ростом напряжения на заднем фронте импульса появляется второй пик (см. рис.2,а осциллограмма (2)). Дальнейшее увеличение напряжения приводит к тому, что амплитуда второго пика быстро увеличивается и его передний фронт приближается к фронту первого пика. При этом амплитуда первого пика растет гораздо медленнее, и

он становится трудно различимым на переднем фронте второго пика (см. рис.2,а осциллограмма (3)). Здесь же, на осциллограммах с большим временным масштабом см. рис.2,б, показан период следования токовых импульсов в зависимости от приложенного к разрядному промежутку напряжения.

Рассмотренная выше динамика нестационарной стадии разряда в лабораторном воздухе качественно сохраняется для сухого воздуха и для обогащенного кислорода, что показано на осциллограммах токовых импульсов разряда в обогащенном кислороде, представленных на рис.3.

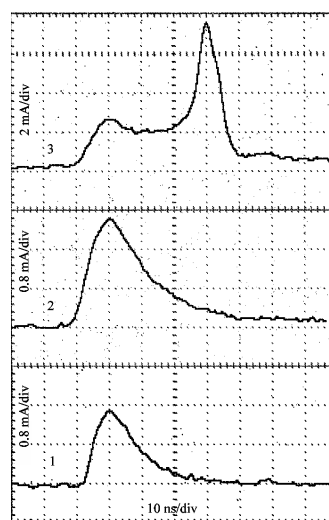


Рис. 3. Осциллограммы импульсов тока разряда в системе электродов игла-плоскость в обогащенном кислороде ( $d=11$  мм). 1 -  $U=9.2$  кВ,  $I_{cp}=15$  мкА; 2 -  $U=12.2$  кВ,  $I_{cp}=30$  мкА; 3 -  $U=14.2$  кВ,  $I_{cp}=45$  мкА

Следует отметить, что параметры импульсов тока при разряде в воздухе и обогащенном кислороде сильно отличаются. Так длительность токового импульса и частота повторения импульсов в кислороде соответственно  $\sim 50$  нс,  $100$  кГц, а в воздухе длительность и частота повторения импульсов составляет  $\sim 500$  нс,  $10$  кГц соответственно.

На осциллограммах рис.4, представлены импульсы разрядного тока и соответствующие им токовые сигналы с ФЭУ для излучения из различных областей разрядного промежутка. На осциллограммах указано расстояние  $X$  (мм) от анода до области разрядного промежутка, из которой через оптическую щель регистрировалось излучение разряда. Видно, что в режиме горения разряда, соответствующем начальной стадии нестационарного протекания тока через разрядный промежуток (рис. 2,а, осциллограмма (1)), регистрируемое оптическое излучение на различных расстояниях от анода имеет импульсный характер (рис. 4,а). Длительность импульсов излучения меньше длительности токового импульса и практически постоянна во всех точках регистрации излучения.

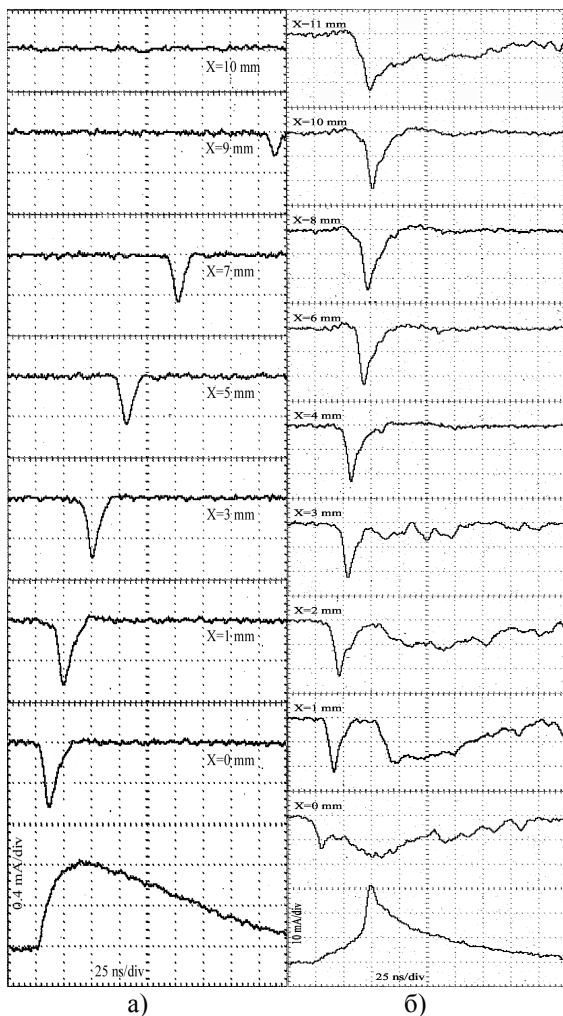


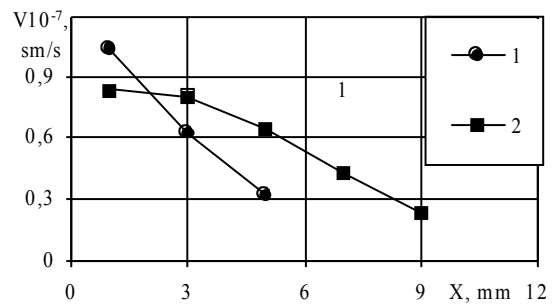
Рис. 4. Осциллограммы токовых импульсов разряда в лабораторном воздухе и сигналы с ФЭУ на различных расстояниях от анода ( $d=11$  мм). а) -  $U=6$  кВ,  $I_{cp}=3.5$  мкА; б) -  $U=11$  кВ,  $I_{cp}=50$  мкА

По мере передвижения оптической щели от анода к катоду импульс излучения уменьшается по амплитуде и исчезает не достигая катода, при этом расстояние, на котором еще можно наблюдать импульс излучения, зависит от приложенного напряжения. Как видно из осциллограмм на рис. 4, а излучение из различных областей промежутка происходит не одновременно. Если регистрируемый импульс тока ФЭУ в окрестности анодной области ( $X=0$  мм) совпадает с фронтом токового импульса разряда, то токовые импульсы излучения из областей разряда удаленных от анода имеют временную задержку относительно фронта токового импульса разряда. Чем дальше от анода располагается область, из которой регистрируется излучение, тем больше временная задержка начала регистрации импульса тока ФЭУ. Причем длительность импульса разрядного тока совпадает со временем, в течение которого удается регистрировать излучение в разрядном промежутке.

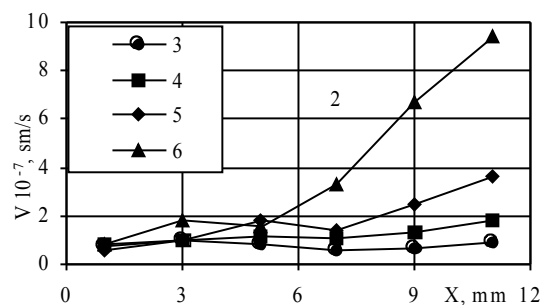
Таким образом, первый режим нестационарного разряда, в котором регистрируются импульсы тока с одним пиком (рис.4,а,б), соответствует распространению стримера, затухающего в разрядном промежутке и не достигающего катода.

При дальнейшем повышении напряжения на спаде токового импульса, а также на сигналах излучения в окрестности острейшего электрода, появляется второй максимум (осциллограммы на рис. 4,б). Т.е. разряд переходит во второй нестационарный режим горения.

Появление излучения в прикатодной области указывает на то, что катодонаправленный стример достиг катода. Начало регистрации второго максимума излучения из прианодной области происходит с временной задержкой, определяемой временем распространения стримера через разрядный промежуток. При перемещении оптической щели от анода к катоду второй максимум импульса излучения уменьшается по амплитуде и исчезает, не достигая катода, при этом расстояние, на котором еще можно наблюдать второй максимум излучения зависит от приложенного напряжения. Следует отметить, что в отличие от свечения стримера, локализованного на головке стримера, излучение, связанное со вторым максимумом, выдвигается от анода и оставляет за собой светящийся канал. Данные результаты хорошо согласуются с предложенной в работе Сигмонда [2] моделью вторичного стримера (вторая волна ионизации). Поэтому второй максимум на импульсе излучения можно связать со второй волной ионизации, которая распространяется от анода к катоду. Излучение из прикатодной области начинается при достижении стримером катода и длится в течение всего времени существования второй волны ионизации. Это говорит о том, что компенсация объемного заряда головки стримера происходит на временах, сравнимых со временем распространения вторичного стримера.



а)



б)

Рис.5. Скорость распространения стримера в лабораторном воздухе ( $d=11$  мм). а - первый режим, б - второй режим. 1 -  $U=4.8$  кВ,  $I_{cp}=1.5$  мкА; 2 -  $U=6$  кВ,  $I_{cp}=3.5$  мкА; 3 -  $U=6.4$  кВ,  $I_{cp}=4.2$  мкА; 4 -  $U=7.6$  кВ,  $I_{cp}=7$  мкА; 5 -  $U=9.2$  кВ,  $I_{cp}=24$  мкА; 6 -  $U=11$  кВ,  $I_{cp}=50$  мкА

Наконец, при достижении критического значения напряжения, когда вторая волна излучения доходит до катода, наступает искровой пробой разрядного промежутка [2].

На основе полученных осциллограмм импульсов ФЭУ рассчитана скорость распространения стримера в обогащенном кислороде, в лабораторном и сухом воздухе для двух режимов нестационарного протекания тока в разрядном промежутке (рис.5).

Из зависимостей скорости распространения первой волны ионизации в лабораторном воздухе видно, что в режиме с не достигающим катода стримером, скорость распространения стримера уменьшается по мере его распространения от анода к катоду. А в режиме с замыкающим промежутком стримером наблюдается замедление стримера в середине промежутка, и ускорение стримера вблизи катода. Аналогичным образом ведет себя скорость распространения стримера в обогащенном кислороде и сухом воздухе.

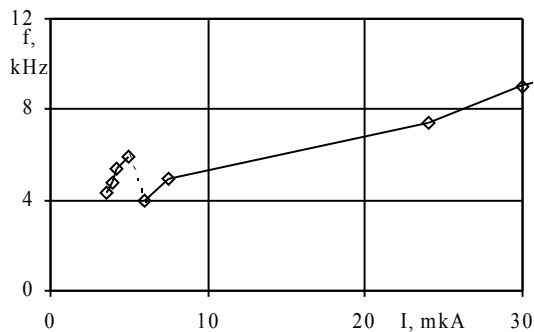


Рис. 6. Зависимость частоты следования токовых импульсов от разрядного тока в лабораторном воздухе в системе электродов игла-плоскость

Из анализа осциллограмм для последовательности токовых импульсов видно, что при переходе от первого ко второму режиму нестационарного горения разряда наблюдается скачок частоты следования импульсов (рис.6). Это вызвано тем, что переходному режиму соответствуют как достигающие катода стримеры, так и стримеры, затухающие в разрядном промежутке.

Сопоставление выше приведенных результатов и вольт-амперной характеристики разряда позволяет разбить ВАХ на 5 участков. Каждый из этих

участков соответствует различным режимам протекания тока в разрядном промежутке: 1 – режим стационарного протекания тока, 2 – первый режим нестационарного (стримерного) протекания тока (стримеры не достигают катода), 3 - переходной режим, соответствующий скачку частоты следования токовых импульсов, 4 - второй режим нестационарного (стримерного) протекания тока (стримера достигают катод и распространяется вторичный стример), 5 - искровой пробой.

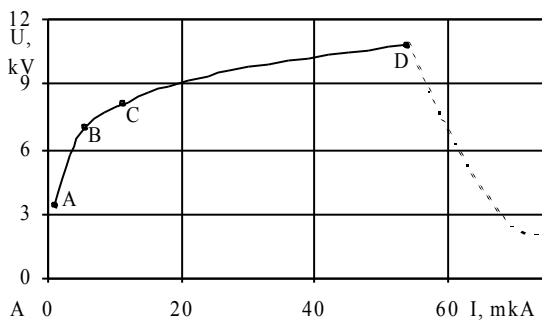


Рис. 7. Характерная ВАХ разряда атмосферного давления в системе электродов игла-плоскость. АВ – стационарный режим (positive corona), BD – нестационарный стримерный разряд, BC – режим с не достигающими катода стримерами, C – переходной режим (скачок частоты следования токовых импульсов разряда), CD – режим с перекрывающимися разрядный промежутком стримерами, D – искровой пробой

Работа выполнена при поддержке УНТЦ (проекты №2144, №1971).

## ЛИТЕРАТУРА

1. А.А. Бруев, В.И. Голота, Л.М. Завада, Б.Б. Кадолин, В.И. Карась, И.А. Пашенко, С.Г. Пугач. Нестационарная стадия тлеющего разряда при положительной полярности атмосферного давления // *ВАНТ*. 2000, № 1, с.50-53.
2. R.S. Sigmond. The residual channel: Return strokes and Secondary streamers // *J.Appl.Phys.* 56(5), 1 September 1984, p.1355-1369.