

# ИЗЛУЧЕНИЕ ИЗ ДРЕЙФОВОЙ ЗОНЫ ОТРИЦАТЕЛЬНОЙ КОРОНЫ В РЕЖИМЕ ИМПУЛЬСОВ ТРИЧЕЛА

*В.И. Голота, В.Н. Остроушко, О.В. Болотов, В.И. Карась, Б.Б. Кадолин*  
*Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт»,  
 Харьков, Украина*

Проведены экспериментальные исследования пространственно-временных характеристик излучения отрицательной короны в режиме импульсов Тричела в воздухе. Выполнено численное моделирование сопутствующих процессов кинетики зарядов. Предложено объяснение результатов экспериментов.

## ВВЕДЕНИЕ

Возрастающий интерес к газовым разрядам повышенного давления обусловлен широким спектром их приложений в различных технологических процессах. В частности, коронный разряд нашел свое применение в таких технологиях, как электросинтез озона, изготовление электрофильтров, нанесение полимерных покрытий и других. При атмосферном давлении разряд может существовать в различных видах в зависимости от формы электродов, полярности и амплитуды приложенного напряжения. Отрицательная корона возникает в электродных системах «игла-плоскость» при подаче на игольчатый электрод отрицательного потенциала с амплитудой, достаточной для поддержания самостоятельного разряда. В некотором интервале напряжений, начиная от напряжения зажигания разряда, разрядный ток представляет собой установившуюся последовательность импульсов, получивших название импульсов Тричела [1]. Увеличение напряжения на разрядном промежутке ведет к увеличению постоянной составляющей тока, уменьшению амплитуды импульсов и увеличению частоты их следования, а при достижении напряжением определённого значения – к переходу разряда в квазистационарный режим [2]. При исследовании коронного разряда обычно различают две области разрядного промежутка: генерационную зону – в непосредственной близости от электрода-острия, где происходят основные ионизационные процессы, и зону дрейфа – остальную часть разрядного промежутка, в которой происходит дрейф заряженных частиц, поступивших из генерационной зоны. Экспериментальные исследования пространственно-временных характеристик излучения из генерационной зоны разряда при низких давлениях были проведены в работе [3]. В той же работе на основании полученных данных показан механизм формирования импульса Тричела. Среди многих работ, посвящённых теоретическому анализу формирования импульсов Тричела, можно выделить работу [4]. Численное моделирование отрицательной короны при малых токах, проведенное в работе [5], позволило воспроизвести последовательность импульсов Тричела в воздухе.

Ранее, в работе [6], было обнаружено свечение из прианодной области отрицательной короны. В данной работе проведены более детальные исследования пространственно-временных характеристик из-

лучения из дрейфовой зоны отрицательной короны и, в частности, из прианодной области. Проведены дополнительные эксперименты, численное моделирование сопутствующих процессов зарядовой кинетики и предложено объяснение некоторых результатов экспериментов.

## 1. ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Принципиальная схема экспериментального стенда представлена на Рис.1. В качестве источника питания использовался стабилизированный источник высокого напряжения до 30 кВ. Напряжение на разрядном промежутке измерялось киловольтметром С196, средний ток разряда – микроамперметром М906. Для поддержания постоянного напряжения на разрядном промежутке в электрическую цепь параллельно включался высоковольтный конденсатор ёмкостью 2200 пФ. Катод представлял собой вольфрамовую иглу длиной 10 мм с радиусом закругления вершины 20 мкм. Анод, изготовленный из нержавеющей стали, в разных экспериментах имел разную форму: диск диаметром 10 мм или сфера диаметром 8 мм. Структура была близка к осесимметричной. Межеlectродное расстояние составляло 7, 10 или 15 мм.

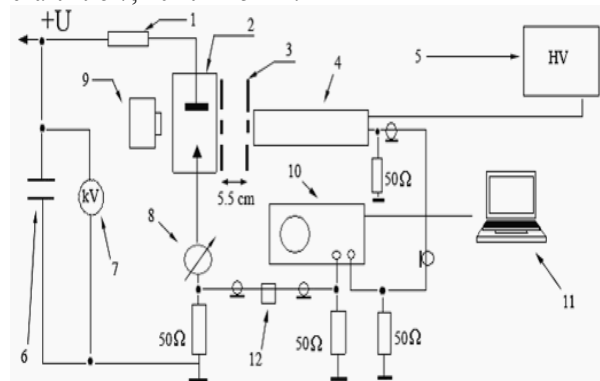


Рис.1. Схема экспериментального стенда:

1 – балластный резистор 130 кОм; 2 – разрядная ячейка; 3 – цель; 4 – ФЭУ 36; 5 – высоковольтный источник питания ФЭУ; 6 – емкостный фильтр напряжения 2200 пФ; 7 – киловольтметр С196; 8 – микроамперметр М906; 9 – фотоаппарат Оlympus С 7070; 10 – осциллограф Tektronix TDS-210; 11 – компьютер IBM PC; 12 – линия задержки 38 нс

Для измерения временных и амплитудных характеристик сигналов использовались калиброванные шунты, сигнал с которых подавался на вход цифро-

вого осциллографа 10 Tektronix TDS210, с частотой дискретизации 1 Гц. Регистрация излучения в видимой части спектра из всего разрядного промежутка осуществлялась цифровым фотоаппаратом 9 Olympus C7070 при фиксированной диафрагме с различными выдержками от 0,002 до 120 с. Временные характеристики излучения из выбранных областей разряда исследовались с помощью ФЭУ 36 со следующими параметрами: разброс времени пролета электронов по фотокатоду 2 нс, время нарастания импульса 3 нс, область спектральной чувствительности 300...600 нм. Излучение из разных областей разряда выделялось с помощью щелей 20×1 мм в двух непрозрачных экранах.

На Рис.2 приведена упрощённая оптическая схема эксперимента.

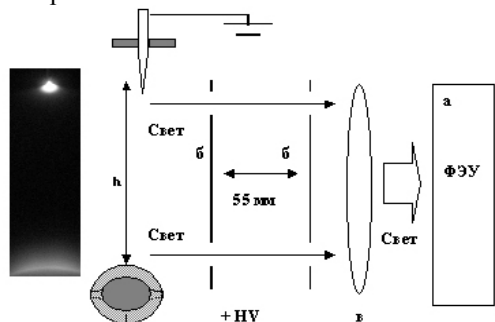


Рис.2. Фотография коронного разряда отрицательной полярности и упрощённая оптическая схема эксперимента:  $h$  – межэлектродный зазор;  $a$  – фотокатод ФЭУ 36;  $б$  – щели;  $в$  – кварцевая линза

В экспериментах одновременно производилась регистрация импульса разрядного тока и сигнала с ФЭУ 36, фотокатод которого освещался излучением из выбранных областей разрядного промежутка. Для синхронизации токового сигнала и сигнала ФЭУ в цепь измерения разрядного тока вводилась линия задержки 38 нс, компенсирующая запаздывание сигнала ФЭУ, обусловленное временем пролета электронов через ФЭУ.

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

На Рис.3 показаны фотографии отрицательной короны в воздухе атмосферного давления при разном приложенном напряжении.

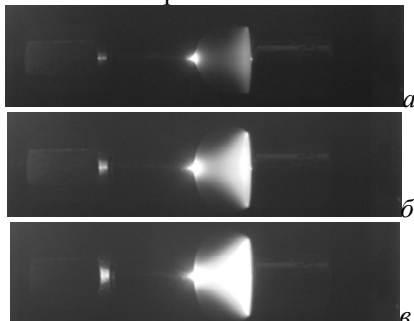


Рис.3. Фотографии (с выдержкой 60 с при фиксированной диафрагме) отрицательной короны в воздухе атмосферного давления:  $a$  – средний ток 24 мкА, напряжение 7 кВ, интервал между импульсами 2.5 мкс;  $б$  – 54 мкА, 9 кВ, 1.1 мкс;  $в$  – 100 мкА, 10.5 кВ, 0.63 мкс

Фотографии позволяют оценить соотношение интенсивностей излучения из разных областей разрядного промежутка. Установлено, что излучение из прикатодной области всегда интенсивнее, чем из прианодной. Как описано в [6], спектр излучения из обеих областей содержит вторую положительную систему азота, обычно сопровождающую процесс ионизации в воздухе.

Импульсы тока ФЭУ, соответствующие импульсам излучения из разных областей разряда, разнесены во времени. Импульс излучения из прикатодной области начинается одновременно с импульсом разрядного тока, а из более удаленных от катода областей – запаздывает по отношению к началу импульса тока на время, тем большее, чем дальше от катода данная область, т.е. изменение свечения со временем имеет вид распространяющейся волны. На Рис.4 приведены характерные осциллограммы разрядного тока (нижний луч) и сигнала с ФЭУ (верхний луч) от излучения из прикатодной и прианодной областей в экспериментах, когда время запаздывания сигнала из прианодной области было минимально (106 нс, при напряжении 9,6 кВ и среднем токе 34 мкА для межэлектродного расстояния 7 мм) и максимально (320 нс при 15 кВ и 6 мкА для 15 мм).

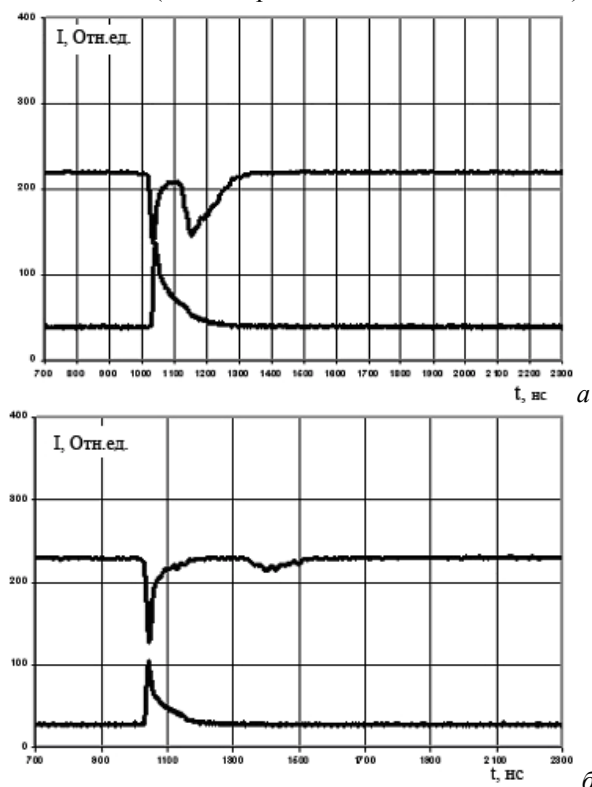


Рис.4. Характерные осциллограммы разрядного тока (нижний луч) и сигнала с ФЭУ (верхний луч) для разряда в режиме импульсов Тричела:  $a$  – межэлектродное расстояние 7 мм, напряжение 9,6 кВ, средний ток 34 мкА, интервал времени между началом импульсов излучения у катода и анода 106 нс;  $б$  – 15 мм, 15 кВ, 6 мкА, 320 нс

Совокупность полученных осциллограмм показывает, что характерная длительность токового импульса – порядка 200 нс, длительность импульса излучения из прикатодной области – порядка 30 нс, а из

прианодной – порядка 200 нс, причем увеличивается с ростом среднего тока разряда и величины разрядного промежутка. Соотношение амплитуд импульсов излучения из прикатодной и прианодной областей зависит от амплитуды приложенного напряжения: при увеличении амплитуды напряжения амплитуда световых импульсов из прианодной области возрастает гораздо сильнее, чем из прикатодных.

Зная время запаздывания светового сигнала из прианодной области и межэлектродное расстояние, можно оценить среднюю скорость распространения волны свечения. Она оказалась порядка величины со скоростью дрейфа электронов, что позволяет предположить, что в области катода в процессе развития импульса тока формируется сгусток электронов, который, перемещаясь в дрейфовой зоне от катода к аноду, вызывает свечение.

Прикатодное свечение локализовано в малой окрестности вблизи вершины катода, и размер этой светящейся области с увеличением напряжения изменяется слабо. Характерные фотографии прикатодной области при разном напряжении на разрядном промежутке приведены на Рис.5. При увеличении напряжения область прикатодного свечения сильно расширяется в направлении, поперечном к оси симметрии.

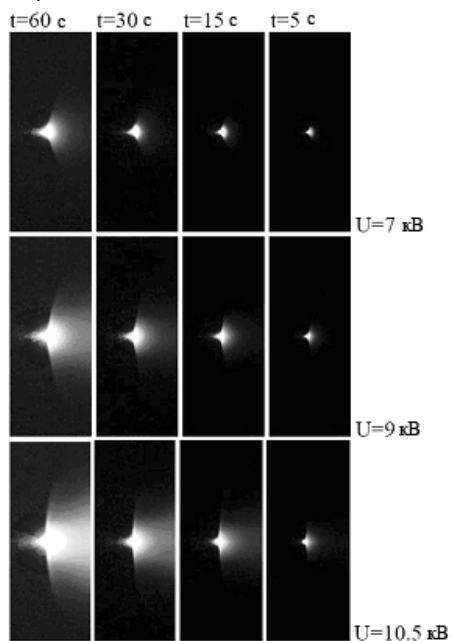


Рис.5. Фотографии (с выдержкой от 60 до 5с при фиксированной диафрагме) прикатодной области отрицательной короны при разном напряжении

Пространственное распределение излучения существенно зависит от формы и размера анода. Размер и интенсивность прианодного свечения увеличиваются с ростом приложенного напряжения, причём светящаяся область может расширяться до середины разрядного промежутка.

### 3. ОБСУЖДЕНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ

Рассмотрим условия, в которых может появиться свечение, наблюдаемое из дрейфовой зоны разрядного промежутка. В спектре излучения из дрейфовой

зоны наблюдается вторая положительная система азота, для появления которой нужна энергия порядка энергии ионизации. Это означает, что напряженность электрического поля достаточно высока. Например, для характерной зависимости коэффициента ионизации от поля  $\alpha = \alpha_0 \exp(-E_0/E)$  с  $\alpha_0 = 5 \cdot 10^3 \text{ см}^{-1}$  и  $E_0 = 1.6 \cdot 10^5 \text{ В/см}$  [4] величина  $\alpha^{-1}$ , соответствующая средней длине пробега электронов между ионизациями, имеет значения  $10^5, 10^4, 10^3, 10^2, 10, 1, 0.1, 10^{-2}$  и  $10^{-3}$  см при напряженности поля 8.0, 9.0, 10.4, 12.2, 14.8, 18.8, 25.7, 41 и 99 кВ/см соответственно. В обсуждаемых экспериментах поперечный размер области свечения — порядка расстояния между электродами, а значит, напряженность поля в этой области соответствует средней для промежутка (порядка 10 кВ/см), не усиливаясь локально, как это происходит в стримере, в связи с малым поперечным размером последнего. В таком поле длина пробега электрона между ионизациями столь велика, что размножения электронов практически не происходит, и свечение связано с довольно редкими актами ионизации и возбуждения молекул, которые в слабом поле, двигаясь к аноду, осуществляет сгусток электронов, образованный вблизи катода-острия во время развития импульса. В слабом поле, когда энергия электронов значительно ниже энергии активации какого-то процесса, относительно небольшое уменьшение энергии электронов сильно снижает интенсивность процесса, поэтому интенсивность свечения в слабом поле очень чувствительна к изменению напряженности поля, и пространственное распределение свечения в значительной мере определяется распределением напряженности поля. В случае сферического анода усиление поля вблизи него наблюдается и в пустом промежутке, а если анод плоский, то поле вблизи него может несколько усиливаться полем объемного заряда отрицательных ионов, заполняющих промежуток. Однако трудно ожидать значительного усиления поля вблизи плоского анода без приблизительно такого же усиления поля в значительной части промежутка. Это связано с тем, что скорость дрейфа при усилении поля увеличивается, а значит, концентрация отрицательных ионов ниже в той части дрейфовой зоны, где поле сильнее, и в соответствии с уравнением Пуассона поле в пространстве вблизи плоского анода меняется медленнее, чем дальше от него.

Пояснить свечение вблизи анода появлением какого-то аналога анодного слоя затруднительно, поскольку не видно причин, по которым он должен быть ограничен только частью пространства между анодом и плазменной областью вблизи катода, а предположение о достаточно высокой напряженности поля во всем этом пространстве не стыкуется со значением приложенного в эксперименте напряжения.

В режимах с большим током, когда в объеме присутствует значительное количество молекул в метастабильных состояниях, появляется возможность ступенчатого перехода молекул в такие состояния, для прямого перехода в которые энергия электронов в данном локальном поле недостаточна.

Такой механизм может вносить вклад в свечение в областях слабого поля в соответствующем режиме разряда.

В условиях, когда анод в разряде покрывается непроводящим слоем, может возникнуть так называемая обратная корона [7], сопровождаемая свечением вблизи анода, однако вклад такого явления в свечение, исследуемое в данной работе, вряд ли присутствует существенно.

Таким образом, в данных условиях источником прианодного свечения, в основном, являются акты ионизации и возбуждения молекул, осуществляемые электронами, образованными вблизи катода и прошедшими через промежуток, что не исключает иной природы прианодного свечения в иных условиях.

Для уточнения приведенных оценок было проведено численное моделирование в предположении осевой симметрии для объема, ограниченного вытянутым эллипсоидом вращения и электродами – гиперboloидами вращения, с теми же фокусами. Движение электронов и ионов, положительных и отрицательных, рассматривалось в диффузионно-дрейфовом приближении, а поле – как электростатическое. Распределение концентраций заряженных частиц изменялось в реакциях ионизации, прилипания, отлипания, ион-ионной и электрон-ионной рекомбинации, начиная с малых величин концентраций. Для частиц на электродах-гиперboloидах было наложено условие отсутствия эмиссии ионов с электродов, условие эмиссии электронов с катода с потоком, пропорциональным дрейфовому потоку положительных ионов на катод, и условие отсутствия диффузионных потоков электронов и ионов на электроды. На боковой, эллипсоидальной, поверхности частицы удалялись из объема. Задавались потенциалы электродов-гиперboloидов, поле рассчитывалось в бесконечном объеме между гиперboloидами при отсутствии зарядов вне эллипсоида. На Рис.6-8 приведены результаты расчетов.

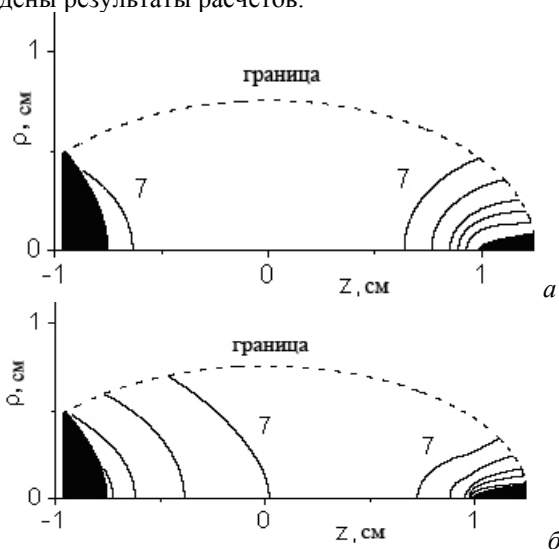


Рис.6. Линии одинаковой напряженности электрического поля (7, 10, 15, 20, 30 кВ/см, увеличивается ближе к электродам) при напряжении 17 кВ в пустом промежутке (а) и в промежутке, заполненном отрицательными ионами за длительное время разряда (б)

Рис.6 иллюстрирует усиление поля вблизи анода полем отрицательных ионов: линиями уровня показано распределение абсолютной величины напряженности электрического поля в структуре с радиусом кривизны у вершины анода 8 мм в случаях, когда промежуток пуст (см. Рис.6,а) и когда он заполнен отрицательными ионами, спустя значительное время после начала разряда (см. Рис.6,б). Рис.7 описывает продвижение от катода к аноду электронного ступка, образованного во время импульса тока: разными кривыми для моментов времени, отстоящих на 25 нс, приведены зависимости линейной концентрации электронов (количества электронов между двумя близкими гиперboloидами в расчете на единицу длины оси между ними) от координаты на оси.

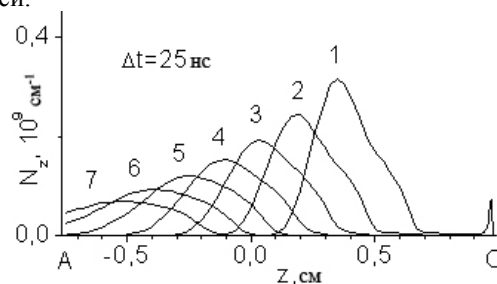


Рис.7. Изменение распределения линейной концентрации электронов (интервал времени 25 нс между последовательными кривыми)

Распространение свечения вблизи катода на довольно большое расстояние от оси симметрии (Рис.5) связано с образованием большого количества положительных ионов во время импульса. При выходе их потока на катод поле ионов, максимальное на периферии потока, складываясь с полем электродов, дает максимальное поле (и максимальный коэффициент ионизации) не на оси, а на периферии потока, что приводит к распределению положительных ионов, характерный вид которого показан на Рис.8 линиями одинаковой концентрации.

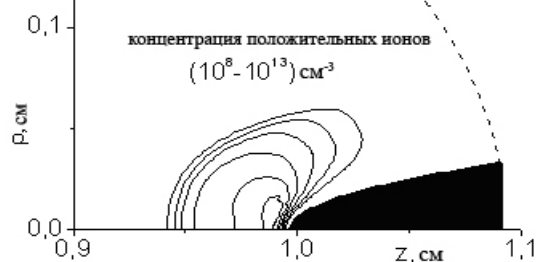


Рис.8. Распределение положительных ионов вблизи катода во время импульса

Картина отражает наблюдаемую на некоторых фотографиях тенденцию к расширению области прикатодного свечения в радиальном (по отношению к оси симметрии) направлении, а в осевом направлении, на больших радиусах – не только в сторону анода, но и в противоположную.

## ВЫВОДЫ

В результате проведенных экспериментальных исследований пространственно-временных характеристик излучения отрицательной короны в воздухе в режиме импульсов Тричела выявлены две основные

области излучения: общеизвестная, вблизи острия-катода, и прианодная. Спектр излучения обеих областей содержит вторую положительную систему азота. Интенсивность излучения из прианодной области существенно зависит от формы анода. Свечение в прикатодной области возникает одновременно с импульсом разрядного тока, и его интенсивность коррелирует с амплитудой импульса тока. Свечение из этой области является следствием наличия свободных электронов и высокой напряженности электрического поля во время формирования импульса. Свечение вблизи анода также является следствием процессов, протекающих у катода, и связано с актами ионизации, которые осуществляет сгусток электронов, двигаясь к аноду. Сгусток электронов образуется вблизи катода-острия во время развития импульса Тричела. Пространственное распределение свечения в значительной мере определяется распределением напряженности поля, и в случае сферического анода усиливается вблизи него. Дополнительно усилить поле ближе к аноду может объемный заряд отрицательных ионов.

Распространение свечения вблизи катода на довольно большое расстояние от оси симметрии связано с усилением там поля, и интенсивности ионизации, объемным зарядом потока положительных ионов, выходящего на катод во время развития импульса.

## ЛИТЕРАТУРА

1. G.W. Trichel. The mechanism of the negative point to plane corona near onset // *Physical Review*. 1938, v.54, №12, p.1078-1084.
2. Ю.П. Райзер. *Физика газового разряда*. М.: «Наука», 1987, с.511-512.
3. R. Zentner. Stufenimpulse der negativen. Koronaentladung elektrotechn // *Z. Agnew Phys*. 1970, v.29, p.294-301.
4. R. Morrow. Theory of negative corona in oxygen // *Physical Review A*. 1985, v.32, №3, p.1799-1809.
5. А.Р. Napartovich, Yu.S. Akishev, А.А. Deryugin, et al. A numerical simulation of Trichel-pulse formation in a negative corona // *J. Phys. D: Appl. Phys*. 1997, v.30, p.2726-2736.
6. В.И. Карась, В.И. Голота, О.В. Болотов, Б.Б. Кадолин, Д.В. Кудин. Особенности излучения коронного разряда отрицательной полярности в воздухе в режиме импульсов Тричела // *Физика плазмы*. 2008, т.34, №10, с.951-958.
7. И.П. Верещагин, А.Б. Котляровский, В.С. Морозов. *Технология и оборудование для нанесения полимерных покрытий в электрическом поле*. М.: «Энергоатомиздат», 1990, с.55-76.

*Статья поступила в редакцию 03.06.2010 г.*

## RADIATION FROM DRIFT ZONE OF NEGATIVE CORONA IN TRICHEL PULSE MODE

*V.I. Golota, V.M. Ostroushko, O.V. Bolotov, V.I. Karas', B.B. Kadolin*

Experimental investigations of spatial-temporal characteristics of negative corona radiation in Trichel pulse mode in air and numerical simulation of connected processes of charged particle kinetics are carried out. Explanation of experimental results is proposed.

## ВИПРОМІНЮВАННЯ З ДРЕЙФОВОЇ ЗОНИ НЕГАТИВНОЇ КОРОНИ В РЕЖИМІ ІМПУЛЬСІВ ТРИЧЕЛА

*В.І. Голота, В.М. Остроушко, О.В. Болотов, В.І. Карась, Б.Б. Кадолін*

Проведено експериментальні дослідження просторово-часових характеристик випромінювання негативною короною в режимі імпульсів Тричела у повітрі та числове моделювання супутніх процесів кінетики зарядів. Запропоноване пояснення результатів експериментів.