

УДК 533.9

В.И. Голота, В.И. Карась, Б.Б. Кадолин, О. В. Болотов, Д.В. Кудин

ННЦ «Харьковский физико-технический институт» НАН Украины, Харьков

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ИЗЛУЧЕНИЯ ОТРИЦАТЕЛЬНОЙ КОРОНЫ В РЕЖИМЕ ИМПУЛЬСОВ ТРИЧЕЛА

Представлены результаты экспериментальных исследований пространственно-временных характеристик излучения отрицательной короны в режиме импульсов Тричела в воздухе. Показано, что для электродной геометрии «игла-сфера» наряду с излучением из окрестности острейшего электрода существует излучение из прианодной области. Установлено, что интенсивность излучения из прианодной области зависит от формы анода. Излучение из каждой приэлектродной области носит импульсный характер. Излучение из прианодной области наблюдается с задержкой после начала импульса разрядного тока. Установлено, что длительность этой задержки зависит от длины разрядного промежутка и величины приложенного напряжения. Показано, что соотношение амплитуд импульсов излучения из прикатодной и прианодной областей также зависит от величины приложенного напряжения.

отрицательная корона, импульс Тричела, излучение, дрейфовая зона, прианодная область, волна возмущения, форма анода

Введение

Возрастающий интерес к газовым разрядам повышенного давления обусловлен широким спектром их приложений в различных технологических процессах. В частности, они широко используются для накачки газовых технологических лазеров, в новейших плазмохимических технологиях получения синтетических топлив из возобновляемого сырья, технологиях очистки и обеззараживания воды, предпосевной обработки посадочного материала, технологиях долговременного хранения пищевых продуктов, технологиях очистки дымовых газов от NO_x и SO_x , электрофильтрах и т.д.

Отрицательная корона, в коротких разрядных промежутках, возникает в резко неоднородных электрических полях, характерных для электродных систем типа «игла-плоскость» при подаче на игольчатый электрод потенциала отрицательной полярности определённой величины, необходимой для реализации самостоятельной формы 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, при фиксированных внешних условиях, приводит к уменьшению амплитуды импульсов Тричела и увеличению частоты следования импульсов. Достигая определённого значения приложенного напряжения можно реализовать переход разряда в диффузную стадию [2], характеризуемую протеканием постоянного тока через разрядный промежуток [3].

При исследовании коронного разряда обычно

различают две области разрядного промежутка: генерационную, т.е. зону коронного разряда, расположенную в непосредственной близости (до 1мм) коронирующего электрода, в которой происходят основные ионизационные процессы, и зону дрейфа - остальную часть разрядного промежутка, в которой происходит дрейф заряженных частиц, поступивших из генерационной зоны. Традиционно исследования пространственно-временных характеристик излучения разряда с отрицательной полярностью на острейшем электроде ограничиваются областью генерационной зоны разряда, т.к. интенсивность излучения из этой области существенно превышает интенсивность излучения из дрейфовой части разрядного промежутка. При этом считается, что излучение в прианодной области разрядного промежутка отсутствует.

Экспериментальные исследования пространственно-временных характеристик излучения из генерационной зоны разряда при низких давлениях были проведены в работе [4]. 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 [5]. Численное моделирование отрицательного коронного разряда при малых токах, проведенное в работе [6], позволило воспроизвести последовательность импульсов Тричела в воздухе. Временные параметры отдельного импульса Тричела, полученные расчетным путем, хорошо согласуются с экспериментальными данными. В то время как, рассчитанная частота следования импульсов не согласуется с экспериментальными данными. Расхождение между результата-

ми экспериментов и численного моделирования указывает на необходимость в продолжении экспериментального изучения отрицательной короны.

Целью данной работы является экспериментальное исследование особенностей пространственно-временных характеристик излучения коронного разряда отрицательной полярности, в режиме установившейся последовательности токовых импульсов Тричела.

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 измерялся с помощью микроамперметра М906. Для поддержания постоянного напряжения на разрядном промежутке в электрическую цепь параллельно включался высоковольтный конденсатор 6, емкостью 2200 пФ. В экспериментах использовалась электродная система «игла–сфера». Катод представлял собой вольфрамовую иглу длиной 10 мм с радиусом закругления вершины 20 мкм. Анодом служила сфера, выполненная из нержавеющей стали, диаметром 8 мм. Разряд исследовался при значениях межэлектродного расстояния 7 мм, 10 мм и 15 мм.

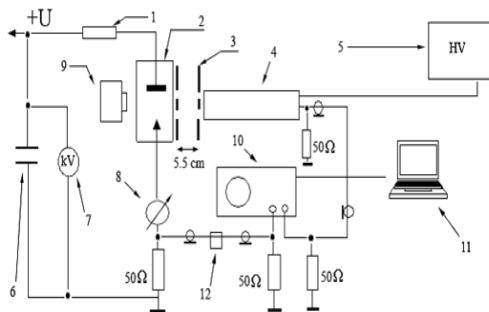


Рис. 1. Схема экспериментального стенда:

- 1 – балластный резистор 130 кОм; 2 – разрядная ячейка;
- 3 – щель; 4 – ФЭУ 36; 5 – высоковольтный источник питания ФЭУ; 6 – емкостной фильтр напряжения 2200 пФ;
- 7 – киловольтметр С196; 8 – микроамперметр М906;
- 9 – фотоаппарат Olympus C 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 цифрового осциллографа 10 Tektronix TDS210. Полоса пропускания осциллографа составляла 60 МГц. 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 секунд. Временные характеристики из-

лучения из выбранных областей разряда, исследовались с помощью ФЭУ 36 со следующими временными параметрами: разброс времени пролета электронов по фотокатоду 2 нс., время нарастания импульса 3 нс. Область спектральной чувствительности ФЭУ 36 составляет 300 – 600 нм. Выделение излучения из областей разрядного промежутка осуществлялось с помощью системы щелей. Щели были выполнены в виде двух непрозрачных экранов, разнесенных друг от друга на расстояние 55 мм, в каждом из которых были вырезаны по два окна размером 20x1 мм. Экраны располагались относительно разрядного промежутка и друг относительно друга так, что через систему щелей были видны только выбранные участки разрядного промежутка у анода и катода.

На рис. 2 приведена упрощенная схема эксперимента. В экспериментах одновременно производилась регистрация форма разрядного тока и сигналы ФЭУ 36, фотокатод которого освещался излучением из выбранных областей разрядного промежутка. Для синхронизации токового сигнала и сигнала ФЭУ 36 в цепь измерения разрядного тока вводилась линия задержки 38 нс., компенсирующая запаздывание сигнала ФЭУ 36, обусловленное временем пролета электронов через ФЭУ.

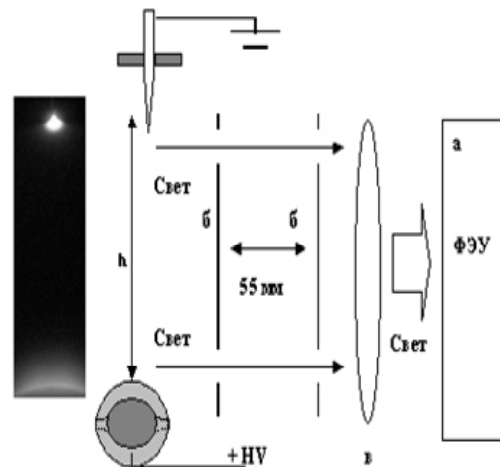


Рис. 2. Фотография коронного разряда отрицательной полярности и упрощенная схема эксперимента, где h – межэлектродный промежуток; а – фотокатод ФЭУ 36; в – кварцевая линза

Результаты экспериментов и их обсуждение

На рис.3 представлены фотографии разряда отрицательной полярности в системе электродов игла–сфера при атмосферном давлении в воздухе при различных токах разряда. Фотографии сделаны с различными выдержками (0,02 – 120 с) при фиксированной диафрагме. Это позволяет, оценить отношение интенсивностей излучения из различных областей разрядного промежутка. Значения выдержки T , при которых были сделаны снимки, подписаны

под каждой фотографией.

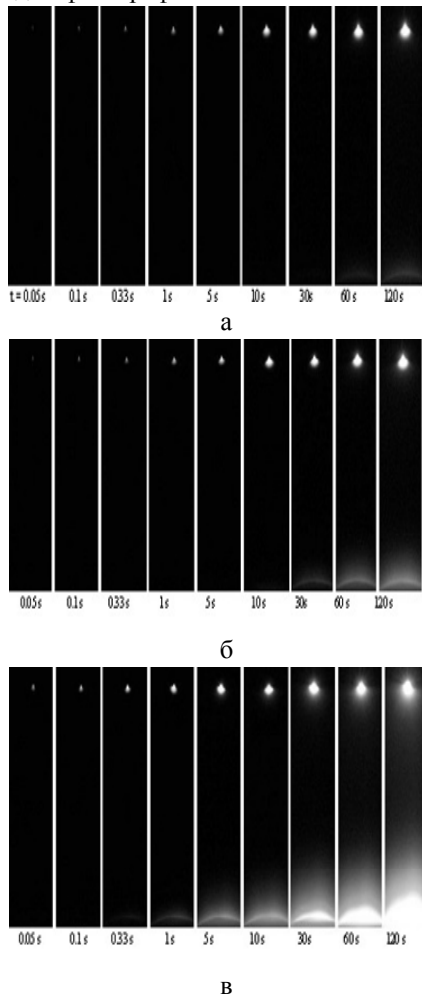


Рис. 3. Фотографии разряда отрицательной полярности в системе электродов игла-сфера при атмосферном давлении в воздухе. Фотографии сделаны с различными выдержками (0,02 – 120 с) при фиксированной диафрагме: а – $I = 6 \text{ мкА}$, $U = 5,3 \text{ кВ}$, период следования импульсов Тричела $T = 6 \text{ мкс}$; б – $I = 11 \text{ мкА}$, $U = 6,43 \text{ кВ}$, $T = 2 \text{ мкс}$; в – $I = 30 \text{ мкА}$, $T = 0,75 \text{ мкс}$, $U = 8,57 \text{ кВ}$

Сравнение фотографий сделанных при фиксированном значении среднего тока разряда и разных выдержках позволяет сделать вывод о том, что интенсивность излучения возле иглы больше интенсивности излучения вблизи сферического анода.

В ходе экспериментов установлено, что за время прохождения токового импульса Тричела, в разрядном промежутке наблюдаются две световые вспышки – одна в прикатодной области, другая в прианодной области разрядного промежутка. Импульсы тока ФЭУ, соответствующие импульсам излучения из прикатодной и прианодной областей, разнесены во времени. Начало импульса излучения из прикатодной области происходит одновременно с началом импульса разрядного тока. Начало импульса излучения из прианодной области всегда запаздывает отношению к началу токового импульса. Экспериментально установлено, что временная задержка между вспышками излучения из прикатод-

ной и прианодной областей зависит как от межэлектродного расстояния, так и от величины разрядного тока. Минимальное время запаздывания между началом импульса излучения у катода и началом импульса излучения у анода имеет место при межэлектродном расстоянии 7 мм, и уменьшается с ростом разрядного тока до величины 106 нс, при напряжении 9,6 кВ, и среднем токе разряда 34 мкА. Максимальная величина задержки прианодной вспышки, полученная в наших экспериментах, составляет 320 нс при межэлектродном расстоянии 15 мм, напряжении 15 кВ и среднем токе разряда 6 мкА.

Характерные осциллограммы разрядного тока (нижний луч) и сигнала с ФЭУ (верхний луч) для двух вышеуказанных случаев, приведены на рис. 4, 5.

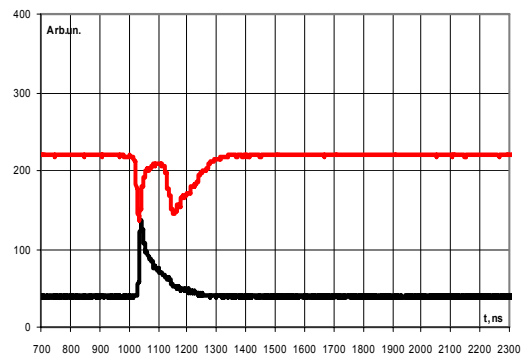


Рис. 4. Типичные осциллограммы разрядного тока (нижний луч) и сигнала с ФЭУ (верхний луч) для отрицательного коронного разряда в режиме импульсов Тричела. Межэлектродное расстояние 7 мм, напряжение 9,6 кВ, средний ток разряда 34 мкА, временная задержка между началом импульса излучения у катода и началом импульса излучения у анода $\sim 106 \text{ нс}$

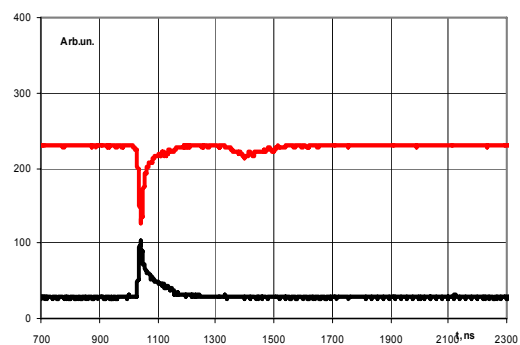


Рис. 5. Типичные осциллограммы разрядного тока (нижний луч) и сигнала с ФЭУ (верхний луч) для отрицательного коронного разряда в режиме импульсов Тричела. Межэлектродное расстояние 15 мм, напряжение 15 кВ, средний ток разряда 6 мкА, временная задержка между началом импульса излучения у катода и началом импульса излучения у анода $\sim 320 \text{ нс}$

Полученные осциллограммы импульсов излучения свидетельствуют о том, что соотношение амплитуд импульсов излучения из прикатодной и прианодной областей зависит от величины приложенного напряжения. Характер изменений амплитуды

регистрируемых импульсов тока ФЭУ, связанных с импульсами излучения у катода, повторяет изменения амплитуды импульсов разрядного тока: с увеличением амплитуды импульсов Тричела амплитуда регистрируемых импульсов тока ФЭУ, соответствующих импульсам излучения у катода, увеличивается. Амплитуда регистрируемых импульсов тока ФЭУ, связанных со вспышками излучения у анода монотонно возрастает с ростом среднего тока разряда, для всех межэлектродных расстояний, при этом длительность импульса излучения из прианодной области также увеличивается с ростом среднего разрядного тока. Характерная длительность импульса излучения из области острейного катода (~30 нс) значительно меньше, чем длительность импульса Тричела (~200 нс). Длительность импульса излучения из прианодной области порядка длительности токового импульса.

Полученные зависимости временной задержки от межэлектродного расстояния и величины приложенного напряжения позволяют предположить, что в области катода, в процессе формирования импульса тока, происходит формирование волны возмущения пространственного заряда. Эта волна, распространяясь в дрейфовой части разрядного промежутка от катода к аноду, может вызывать свечение в анодной области. Из приведенных на рис. 4 осциллограмм можно оценить среднюю по разрядному промежутку скорость распространения волны возмущения как отношение расстояния между излучающими зонами к величине временной задержки между импульсами излучения из прикатодной и прианодной областей. Зависимость оцененной скорости распространения волны возмущения от средней по разрядному промежутку напряженности электрического поля приведена на рис. 6.

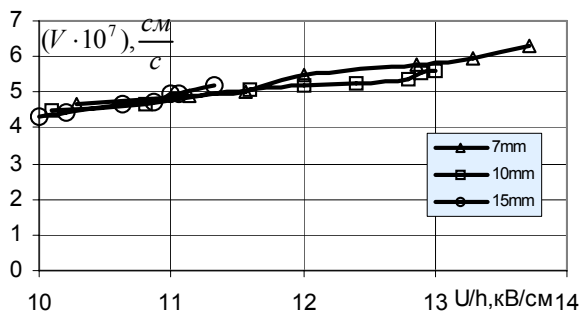


Рис. 6. Вычисленная скорость распространения волны возмущения в зависимости от средней по разрядному промежутку напряженности электрического поля U/h для межэлектродных расстояний 7 мм, 10 мм, 15 мм

Оцененная средняя скорость распространения волны возмущения оказалась одного порядка величины со скоростью дрейфа электронов, и значительно превосходит скорость дрейфа ионов для исследуемого диапазона значений средней по разрядному

промежутку напряженности электрического поля U/h . Однако у нас нет оснований полагать, что волна возмущения распространяется в разрядном промежутке с постоянной скоростью.

Необходимо также отметить, что пространственный характер излучения отрицательной короны в воздухе в режиме импульсов Тричела, существенно зависит от формы и размера анода, что явно иллюстрируют приведенные на рис. 7 статические фотографии разряда. Ограничение сечения токового канала приводит к увеличению интенсивности области анодного свечения.

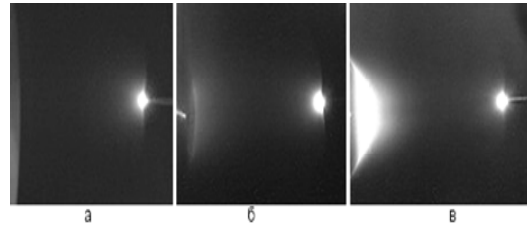


Рис. 7. Фотографии отрицательной короны в воздухе для различных электродных систем. В качестве плоскости использованы, выполненные из нержавеющей стали диск диаметром 28 мм, усеченный конус с углом при вершине 150° и диаметрами у вершины и основания 5 мм и 34 мм соответственно. Межэлектродное расстояние 15 мм.

Фотографии сделаны с выдержкой 120 сек: а – игла-плоскость, средний ток разряда 43 мкА; б – игла-усеченный конус, ток 48 мкА; в – игла-сфера ток 48 мкА

Для того чтобы выяснить причинную связь между импульсом Тричела и процессами, происходящими в области анода необходимо провести дополнительные исследования с использованием более чувствительных приемников излучения, а также определить спектральный состав излучения.

Экспериментальные исследования отрицательного коронного разряда, в режиме импульсов Тричела, для электродных геометрий типа «игла-плоскость» и «игла-сфера» показали, что при фиксированных параметрах разряда (напряжение, средний ток разряда, межэлектродное расстояние) в электродной геометрии игла-плоскость излучение в области анода не наблюдается, в отличие от электродной геометрии игла-сфера.

Такое изменение электродной конфигурации слабо изменяет вакуумное распределение электрического поля, но, несмотря на небольшие отличия в вакуумном распределении электрического поля, при атмосферном давлении для разряда в электродной геометрии игла-сфера (при $R \sim d$), можно наблюдать свечение и в прианодной области. Изменение геометрии электродной системы, при фиксированных параметрах разряда, явно приводит к появлению излучения в прианодной области, что свидетельствует о том, что процессы фотоэмиссии с анода, вызванные УФ излучением разряда, не оказывают влияния на процесс формирования прианодной области излучения. Размер и интенсивность прианодного свечения увеличиваются с ростом при-

ложенного напряжения, причём светящаяся область может расширяться до середины разрядного промежутка. В то время как свечение острейного катода локализовано в малой окрестности вблизи его вершины, а размер светящейся области, с увеличением напряжения, изменяется слабо.

Характер изменений интенсивности излучения в прикатодной и прианодной областях с увеличением напряжения можно проследить при регистрации излучения разряда за время, значительно превышающее период следования импульсов Тричела.

Выводы

В результате проведенных экспериментальных исследований пространственно-временных характеристик излучения отрицательной короны в воздухе в режиме импульсов Тричела, выявлено две основные области излучения разряда. Наряду с существованием общеизвестной области излучения вблизи острейного электрода, показано наличие прианодной области излучения. Установлено, что 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 Тричела. Существование свечения в этой области есть следствием наличия свободных электронов и высокой напряженности электрического поля во время формирования импульса Тричела. Существование области излучения вблизи анода так же является следствием процессов протекающих у катода, поскольку при фиксированных внешних параметрах (приложенное напряжение, величина межэлектродного расстояния) существует всегда и с одной и той же времен-

ной задержкой по отношению к импульсу Тричела. С другой стороны для появления свечения необходимо наличие как заряженных частиц, так и повышенной напряженности электрического поля для протекания интенсивных ионизационных процессов, сопровождающихся излучением. Поэтому можно предположить распространение в разрядном промежутке волны возмущения пространственного заряда, являющейся следствием формирования импульса Тричела, и вызывающей свечение в прианодной области. Для подтверждения этого необходимы дальнейшие исследования природы возникновения излучения в прианодной области, а также исследование его спектральных характеристик.

Список литературы

1. Trichel G.W. The mechanism of the negative point to plane corona near onset // *Phys.Rev.* – 1938. – V. 54. – P. 1078.
2. Акишев Ю.С., Грушин М.Е., Каральник В.Б., Трушкин Н.И. Пульсирующий режим отрицательной короны в азоте // *Физика плазмы.* – 2001. – Т. 27, № 6. – С. 550.
3. Райзер Ю.П. Физика газового разряда. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1987. – 592 с.
4. Zentner R. Stufenimpulse der negativen. Koronaentladung *elekirotechn // Z. Agnew Phys.* – 1970. – V. 29. – P. 294-301.
5. Morrow R. Theory of negative corona in oxygen // *Phys.Rev.A.* – 1985. – V. 32. – P. 1799-1809.
6. Napartovich A.P., Akishev Yu.S., Deryugin A.A. et al. A numerical simulation of Trichel-pulse formation in a negative corona // *J. Phys. D: Appl. Phys.* – 1997. – V. 30. – P. 2726.

Поступила в редколлегию 3.03.2008

Рецензент: д-р техн. наук, проф. А.И. Стрелков, Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков.

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОСТОРОВО ЧАСОВИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВИПРОМІНЮВАННЯ НЕГАТИВНОЇ КОРОНИ У РЕЖИМІ ІМПУЛЬСІВ ТРИЧЕЛА

Голота В.І., Карась В.І., Кадолін Б.Б., Болотов О.В., Кудін Д.В.

Представлені результати експериментальних досліджень просторово-часових характеристик випромінювання негативної корони в режимі імпульсів Тричела в повітрі. Показано, що для електродної геометрії «голка-сфера» разом з випромінюванням в околиці острейного електроду існує випромінювання з прианодної області. Встановлено, що інтенсивність випромінювання з прианодної області залежить від форми анода. Випромінювання з кожної приелектродної області носить імпульсний характер. Випромінювання з прианодної області спостерігається із затримкою після початку імпульса розрядного струму. Встановлено, що тривалість цієї затримки залежить від довжини розрядного проміжку і величини прикладеної напруги. Показано, що співвідношення амплітуд імпульсів випромінювання з прикатодної і прианодної областей також залежить від величини прикладеної напруги.

Ключові слова: негативна корона, імпульс Тричела, випромінювання, дрейфова зона, прианодна область, хвиля обурення, форма анода.

THE EXPERIMENTAL STUDY OF LIGHT EMISSION FROM NEGATIVE CORONA DISCHARGE ON TRICHEL PULSED MODE

Golota V.I., Karas' V.I., Kadolin B.B., Bolotov O.V., Kudin D.V.

The results of experimental researches of spatio-temporal descriptions of radiation of negative crown are presented in the mode of impulses of Trichela in mid air. It is shown that for electrode geometry a «needle-sphere» along with a radiation from neighbouring of sharpen electrode exists radiation from a anode area. It is set that intensity of radiation from a anode area depends on the form of anode. A radiation from every electrode area takes impulsive character. A radiation from a anode area is observed time-lagged after the beginning of impulse of bit current. It is set that duration of this delay depends on length of bit interval and size of the attached tension. It is shown that correlation of amplitudes of impulses of radiation from cathode and anode areas also depends on the size of the attached tension.

Keywords: negative crown, impulse of Trichela, radiation, drift area, anode area, wave of indignation, form of anode.