

УДК 533.9

В.И. Голота, Б.Б. Кадолин, О.В. Болотов, В.Н. Остроушко, С.Н. Маньковский

ННЦ «Харьковский физико-технический институт» НАН Украины

## ИССЛЕДОВАНИЯ РАЗРЯДА В СИСТЕМЕ ЭЛЕКТРОДОВ ИГЛА – ПЛОСКОСТЬ ПРИ ПОВЫШЕННЫХ ДАВЛЕНИЯХ ВОЗДУХА (КАТОДОНАПРАВЛЕННЫЙ СТРИМЕР)

*Была разработана и построена экспериментальная установка, выполнены научные исследования пространственно-временных характеристик стримера для различных газовых разрядов. Используя эту установку, выполнены экспериментальные исследования динамики стримера в неоднородном электрическом пространстве и при высоком давлении воздуха. В результате обработки компьютером экспериментальных данных были получены зависимости скорости распространения стримера по разрядному промежутку при различных давлениях в воздухе. Для этого использовались прикладные программы. Характер изменения скорости стримера по разрядному промежутку рассчитан для неустойчивого фронта стримера. Анализ экспериментальных результатов, где скорость стримера и ее максимальная длина были уменьшены с увеличением давления, позволяет сделать выводы, что для высоких давлений имеет место существенное уменьшение проводимости канала плазмы стримера.*

*стример, высокое давление воздуха, разрядный промежуток*

### Введение

В настоящее время быстрыми темпами развиваются промышленные технологии с использованием газовых разрядов в воздухе. Стримерная корона занимает особое место, поскольку широко используется в промышленности для синтеза озона, в медицине, в сельском хозяйстве. Коронный разряд явился одним из первых видов разрядов, который систематически изучался на протяжении длительного периода времени, тем не менее, удовлетворительная теория разряда так и не разработана, и многие особенности формирования и развития разряда остаются слабо изученными. Исследование пространственно-временных характеристик излучения стримерной короны, для различных режимов горения разряда при повышенных давлениях в воздухе, представляет интерес для более глубокого понимания процессов формирования и развития различных стадий разряда для коротких разрядных промежутков.

### Постановка эксперимента

Перед проведением экспериментов по исследованию пространственно-временных характеристик интегрального излучения из зоны разряда положительной полярности и определению скорости распространения стримера производилась специальная обработка игольчатого и плоского электродов для устойчивого режима горения разряда. Показателем устойчивого горения разряда была стационарная форма регистрируемого во внешней цепи токового импульса, формирование которого обусловлено процессами, протекающими в разрядном промежутке. Стационарность формы токового импульса и частоты следования токовых импульсов соответст-

вовала устойчивому режиму горения разряда, при котором в разрядном промежутке формируются и распространяются стримера с приблизительно одинаковыми значениями таких параметров, как: средняя скорость распространения, проводимость плазменного канала стримера и др. Поскольку экспериментальная аппаратура не позволяла регистрировать значения скорости определённого стримера в различных областях разрядного промежутка, т.е. производить измерения параметров фиксированного стримера, во всех экспериментах измерения параметров стримера производились в условиях режима устойчивого горения разряда.

Исследования пространственно-временных характеристик интегрального излучения из зоны разряда положительной полярности при различных давлениях в воздухе производилось на установке, схематически изображённой на рис. 1.

Положительный потенциал подавался на иглу, плоский электрод находился под потенциалом земли. Величина межэлектродного расстояния регулировалась и могла изменяться в пределах от 5 до 15 мм. Разрядная камера позволяла работать при повышенных давлениях воздуха до 5 атм. Повышенное давление в разрядной камере создавалось в потоке воздуха, который создавался при помощи компрессора Fiac F 205. Величина давления регулировалась двумя натекателями, которые были установлены на входе и выходе камеры. Значение давления регистрировалось при помощи манометра. Величина расхода для всех экспериментов составляла около 1 л/мин и измерялась ротаметром на выходе камеры. Напряжение на разрядном промежутке измерялось киловольтметром С196. Средний ток разряда измерялся с помощью микроамперметра М906. Для фик-

сирования формы разрядного тока в разрядную цепь устанавливался шунт  $50\Omega$ , сигнал с которого подавался на первый канал двухканального осциллографа Tektronix TDS210 с полосой пропускания 60 МГц. В экспериментах излучение из выделенной щели зоны разряда детектировалось с помощью ФЭУ-106 с полосой спектральной чувствительности 170 – 830 нм. Сигнал с ФЭУ-106 регистрировался

вторым каналом осциллографа Tektronix TDS-210, который был соединён с компьютером. Сигнал обрабатывался на компьютере PC с помощью пакета прикладных программ. Для синхронизации токового сигнала и сигнала ФЭУ-106 в разрядную цепь вводилась линия задержки 38 нсек, компенсирующая запаздывание сигнала ФЭУ, определяемое временем пролета электронов через ФЭУ.

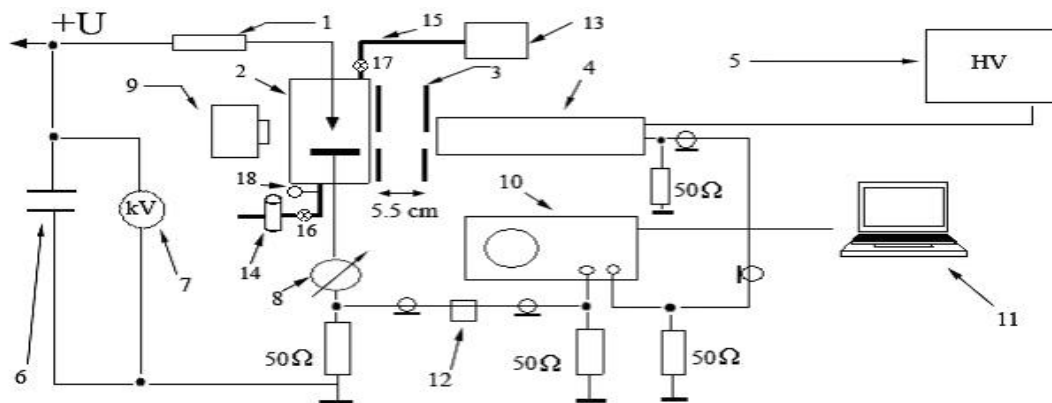


Рис. 1. Установка: 1 – балластный резистор 130 kΩ; 2 – разрядная камера; 3 – передвижная щель; 4 – ФЭУ-106; 5 – высоковольтный источник питания ФЭУ-106; 6 – емкостной фильтр напряжения 1000 пФ; 7 – киловольтметр С196; 8 – микроамперметр М906; 9 – фотоаппарат Olympus С 7070; 10 – осциллограф Tektronix TDS-210; 11 – компьютер IBM PC; 12 – линия задержки 38ns; 13 – компрессор; 14 – ротаметр; 15 – шланг; 16,17 – натекатели; 18 – манометр

Проведенный эксперимент с использованием передвижной щели позволил отследить динамику области свечения. Щель, устанавливаемая между зоной разряда и плоскостью окна ФЭУ-106, могла передвигаться вдоль разрядного промежутка. Таким способом удавалось выделять излучение из ограниченных областей разрядного промежутка. Снятые осциллограммы импульсов тока ФЭУ, соответствующие световым импульсам из различных участков разрядного промежутка, свидетельствуют о временной динамике области свечения, т.е. о её движении вдоль разрядного промежутка. Ниже на рис. 2 представлены характерные осциллограммы световых импульсов, полученных из различных участков разрядного промежутка, и соответствующих им импульсов тока разряда. Осциллограммы отображают временную динамику области свечения в разрядном промежутке для двух характерных режимов горения разряда – режима замыкающего и незамыкающего разрядный промежутков стримера.

Приведенные осциллограммы показывают, что излучение разряда начинается одновременно с началом токового импульса. Область свечения, имеющая некоторый характерный размер, перемещается от иглы к катоду, что соответствует распространению волны ионизации в разрядном промежутке. Для случая, замыкающего разрядный промежутков стримера, интенсивность излучения, регистрируемого из различных областей разрядного промежутка, увели-

чивается по мере приближения к плоскому электроду, в то время, как в случае незамыкающего стримера наблюдается противоположная ситуация. На приведенной осциллограмме для случая замыкающего стримера можно также отметить, что после достижения стримером катода возле иглы образуется ещё одна зона свечения, появление которой связывают с распространением «вторичного» стримера. Таким образом, можно оценить скорость распространения фронта стримера по временной динамике области свечения.

Определение скорости распространения стримера при повышенных давлениях в воздухе проводилось при одинаковых значениях средней приведенной напряжённости электрического поля  $(E/P)_{cp} = U/(d*P)$ , где  $d$  – межэлектродное расстояние (13 мм);  $P$  – давление;  $U$  – напряжение на разрядном промежутке. В экспериментах для различных значений давления воздуха в разрядной камере фиксированная величина  $(E/P)_{cp}$  устанавливалась путём изменения напряжения на разрядном промежутке. Давление воздуха в разрядной камере изменялось в диапазоне от 1 до 3 атмосфер с шагом 0,5 атм. Для каждого значения давления в разрядной камере устанавливалось одно из трёх значений  $(E/P)_{cp} = 7,21; 8,26; 8,94$  В/(см\*торр). При проведении экспериментов регистрировались значения среднего тока разряда и частоты следования импульсов тока.

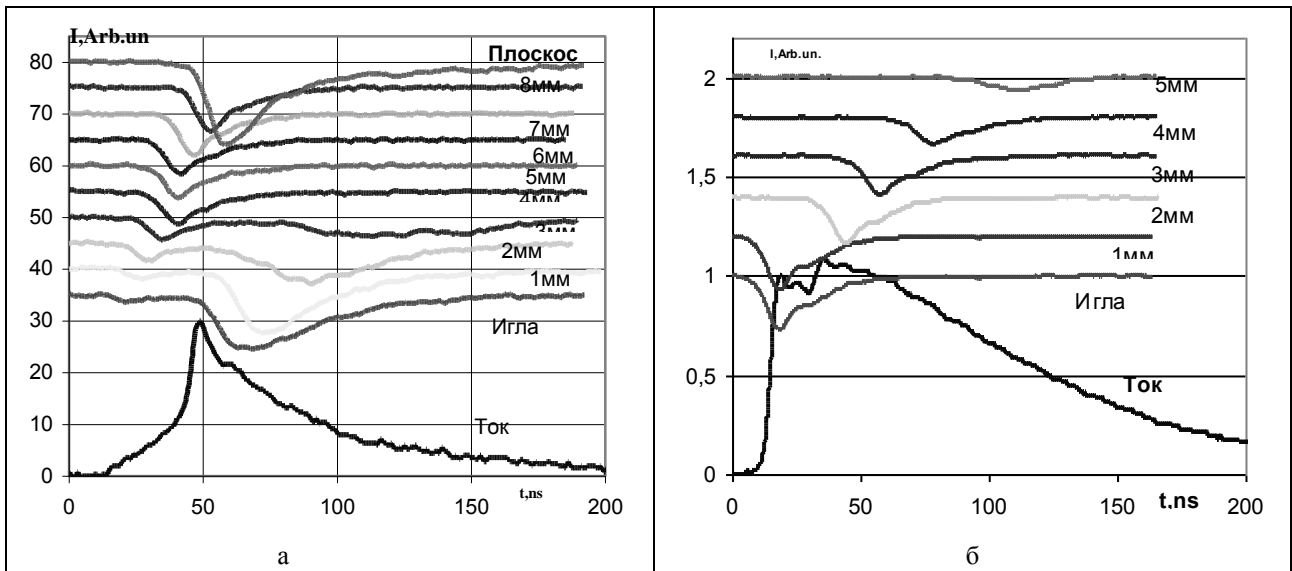


Рис. 2: а – типичная осциллограмма импульса разрядного тока и импульсов тока ФЭУ, соответствующих световым импульсам, полученным из различных участков разрядного промежутка. Осциллограммы импульсов тока ФЭУ соответствуют различным положениям щели, передвигаемой вдоль разрядного промежутка. Цифры на осциллограммах соответствуют расстоянию в (мм), отсчитываемому от иглы до щели. Разряд характеризуется наличием замыкающих разрядный промежуток стримеров; б – типичная осциллограмма импульса разрядного тока и импульсов тока ФЭУ, соответствующих световым импульсам, полученным из различных участков разрядного промежутка. Разряд характеризуется наличием не замыкающих разрядный промежуток стримеров

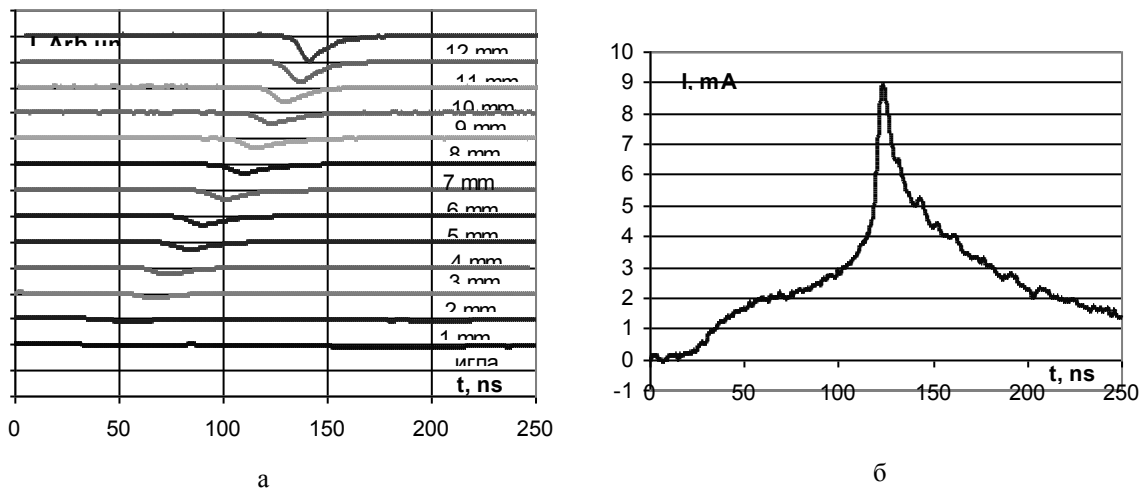


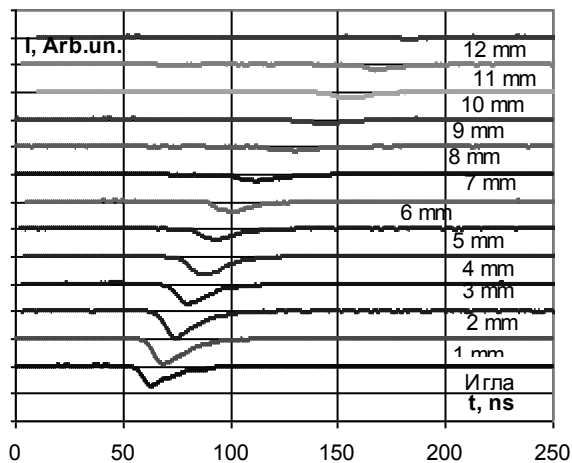
Рис. 3: а – осциллограмма импульсов тока ФЭУ, соответствующих световым импульсам, полученным из различных участков разрядного промежутка при атмосферном давлении. Осциллограммы импульсов тока ФЭУ соответствуют различным положениям щели, передвигаемой вдоль разрядного промежутка. Цифры на осциллограммах соответствуют расстоянию (мм), отсчитываемому от иглы до щели. Разряд характеризуется наличием замыкающих разрядный промежуток стримеров. Межэлектродное расстояние – 13 мм. Средний ток разряда 20 мкА, напряжение 8.9 кВ, период следования импульсов – 134 мкс. Приведенные импульсы тока ФЭУ нормированы на максимальную амплитуду; б – осциллограмма импульса разрядного тока при атмосферном давлении. Межэлектродное расстояние – 13мм. Средний ток разряда – 20 мкА, напряжение – 8.9 кВ, период следования импульсов – 134 мкс

На рис. 3 – 5 приведены осциллограммы световых импульсов, полученных из различных участков разрядного промежутка, и соответствующих им импульсов тока разряда при значении средней приведенной напряженности электрического поля  $(E/P)_{cp} = 8.94 \text{ В/(см*горр)}$ . Осциллограммы приведены для значений давления 1 атм.; 2,5 атм.; 3 атм.

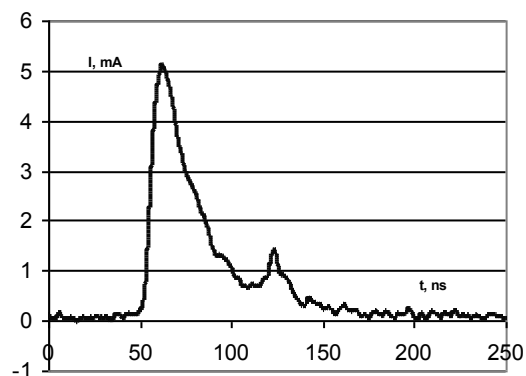
Из приведенных на рис. 3 – 5 осциллограмм видно, что при фиксированном значении средней приведенной напряженности электрического поля разряд при атмосферном давлении характеризуется наличием замыкающих разрядный промежуток стримеров, интенсивность излучения из области фронта стримера возрастает по мере продвижения

стримера от анода к катоду. На расстоянии 1 мм от плоского катода интенсивность излучения фронта стримера максимальна по отношению к интенсивности излучения фронта стримера из остальных областей разрядного промежутка. При давлении 2,5 атм. разряд также характеризуется наличием замыкающих стримеров, однако интенсивность излу-

чения из области фронта стримера падает по мере приближения стримера к плоскому катоду и на расстоянии 1 мм от него имеет минимум по отношению к интенсивности излучения из остальных областей разрядного промежутка.

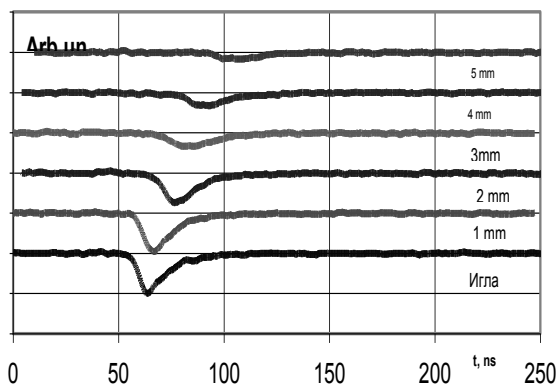


а

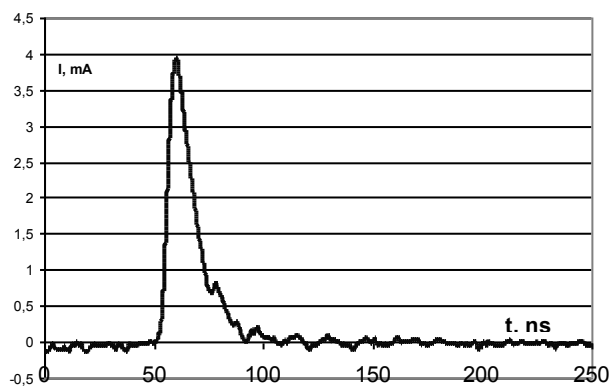


б

Рис. 4: а – оциллограмма импульсов тока ФЭУ, соответствующих световым импульсам, полученным из различных участков разрядного промежутка при давлении 2,5 атм. Оциллограммы импульсов тока ФЭУ, соответствуют различным положениям щели, передвигаемой вдоль разрядного промежутка. Разряд характеризуется наличием замыкающих разрядный промежуток стримеров. Межэлектродное расстояние – 13 мм. Средний ток разряда – 50 мкА, напряжение – 22,1 кВ, период следования импульсов – 17 мкс. Приведенные импульсы тока ФЭУ нормированы на максимальную амплитуду; б – оциллограмма импульса разрядного тока при давлении – 2,5 атм. Межэлектродное расстояние – 13мм. Средний ток разряда – 50 мкА, напряжение – 22,1 кВ, период следования импульсов – 17 мкс



а



б

Рис. 5: а – оциллограмма импульсов тока ФЭУ, соответствующих световым импульсам, полученным из различных участков разрядного промежутка при давлении 3 атмосферы. Разряд характеризуется наличием незамыкающих разрядный промежуток стримеров. Межэлектродное расстояние – 13 мм. Средний ток разряда – 58 мкА, напряжение – 26,5 кВ, период следования импульсов – 4,96 мкс. Приведенные импульсы тока ФЭУ нормированы на максимальную амплитуду; б – оциллограмма импульса разрядного тока при давлении 3 атмосферы. Межэлектродное расстояние 1–3мм. Средний ток разряда – 58 мкА, напряжение – 26,5 кВ, период следования импульсов – 4,96 мкс.

При давлении 3 атм. замыкание стримером разрядного промежутка прекращается, в разрядном промежутке распространяются только незамыкающие стримера, которые прекращают своё распро-

странение («затухают») на расстоянии порядка 5 мм. от игольчатого анода. В этом случае интенсивность излучения из области фронта стримера падает по мере движения стримера от игольчатого анода.

Отсутствие импульса излучения на определённом расстоянии от игольчатого анода свидетельствует о прекращении распространения стримера в разрядном промежутке, а величина расстояния, на котором происходит «затухание» стримера, соответствует расстоянию, на котором стример прекращает своё распространение.

Определение скорости распространения стримера по разрядному промежутку производилось путём обработки осциллограмм импульсов тока ФЭУ, соответствующих световым импульсам из различных участков разрядного промежутка, и импульсов тока разряда. Запуск сигнала с ФЭУ был синхронизован с началом токового импульса, начало которого соответствует моменту времени, когда начинается распространение стримера. Полученные осциллограммы импульсов тока ФЭУ, которые соответствуют импульсам света из фиксированных участков разрядного промежутка, позволили определить временной интервал между началом регистрации импульсов излучения из различных областей разрядного промежутка. Зная расстояние между областями, из которых регистрировалось излучение,

можно оценить скорость распространения области излучения. Скорость фронта стримера определялась из соотношения

$$V_{str} = \frac{\Delta x}{\Delta t},$$

где  $\Delta x$  – расстояние между областями разрядного промежутка, из которых регистрировалось излучение;  $\Delta t$  – временной интервал (задержка) между началом регистрации импульсов излучения из областей разрядного промежутка, расположенных на расстоянии  $\Delta x$  друг от друга.

В результате обработки экспериментальных данных удалось определить значения скорости стримера в различных областях разрядного промежутка. Установлено, что скорость распространения стримера не постоянна вдоль разрядного промежутка, а также имеет характерные особенности возле электродов. На рис. 6, 7 представлены графики полученных зависимостей значений скорости распространения стримера по разрядному промежутку для различных значений средней приведенной напряжённости электрического поля  $(E/P)_{cp}$

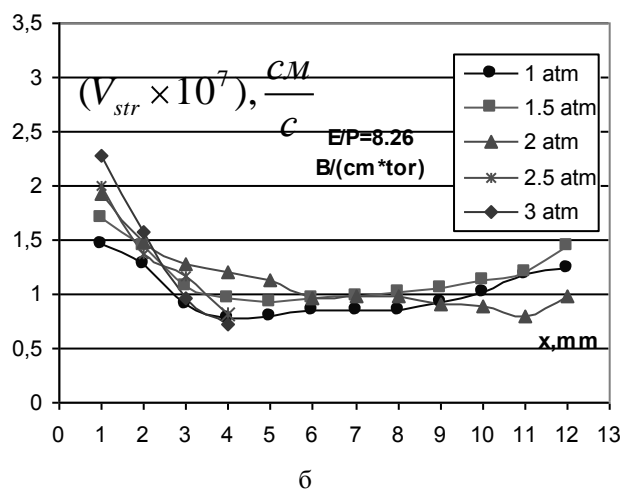
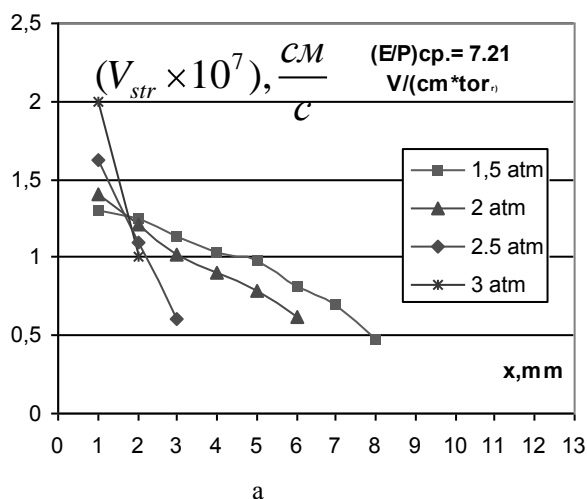


Рис. 6: а – график зависимости значений скорости распространения стримера по разрядному промежутку для различных давлений в воздухе. По горизонтальной оси обозначены участки разрядного промежутка, на которых производилось измерение скорости стримера. X – расстояние, отсчитываемое от игольчатого анода. Величина средней приведенной напряжённости электрического поля  $(E/P)_{cp} = 7,21$  В/(см\*торр); б – график зависимости значений скорости распространения стримера по разрядному промежутку для различных давлений в воздухе.  $(E/P)_{cp} = 8,26$  В/(см\*торр)

Из приведенных графиков видно, что при значении средней приведенной напряжённости электрического поля  $(E/P)_{cp} = 7,21$  В/(см\*торр) в разрядном промежутке распространяются только незамыкающие стримера во всём диапазоне давлений. С увеличением давления величина расстояния, проходимого стримером в разрядном промежутке до его полной остановки, сокращается. Для всех значений давления в диапазоне от 1,5 атм. до 3 атм. величина скорости стримера в области игольчатого ано-

да максимальна по отношению к значениям скорости в остальных областях разрядного промежутка. По мере продвижения стримера от анода скорость стримера уменьшается вплоть до момента его полной остановки.

При значении  $(E/P)_{cp} = 8,26$  В/(см\*торр) в разрядном промежутке распространяются как замыкающие, так и незамыкающие стримера в зависимости от величины давления. При давлениях 1; 1,5 и 2 атм. в промежутке распространяются замыкающие

стримера. Скорість стримеров в указанном диапазоне давлений не постоянна по промежутку и имеет особенности вблизи электродов. Наблюдается увеличение скорости вблизи электродов. В области игольчатого анода величина скорости стримера максимальна по отношению к значениям скорости на остальных участках разрядного промежутка. При давлениях 2,5 атм. и 3 атм. в разрядном промежутке распространяются незамыкающие стримера, их скорость имеет максимум возле анода и уменьшается по мере продвижения стримера вглубь разрядного промежутка.

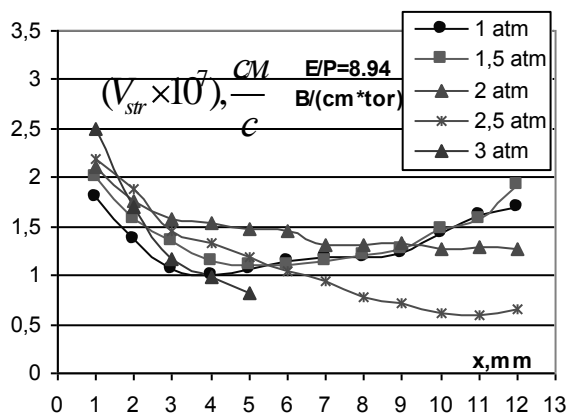


Рис. 7. График зависимости значений скорости распространения стримера по разрядному промежутку для различных давлений в воздухе. Величина средней приведенной напряженности электрического поля  $(E/P)_{cp} = 8,94 \frac{V}{cm \cdot torr}$

Для значения  $(E/P)_{cp} = 8,94 \frac{V}{cm \cdot torr}$  при давлениях 1; 1,5; 2; 2,5 атм. в разрядном промежутке распространяются замыкающие стримера. При давлениях 1 атм. и 1,5 атм. скорость распространения стримера имеет характерные особенности вблизи электродов. Наблюдается максимум скорости вблизи игольчатого анода, и некоторое увеличение скорости в области плоского катода. Для давлений 2 атм. и 2,5 атм. скорость стримера имеет максимум возле анода и постепенно уменьшается по мере продвижения стримера к катоду, что чётко выражено при давлении 2,5 атм. Увеличение давления до 3 атм. приводит к прекращению замыкания стримером разрядного промежутка. В промежутке распространяются незамыкающие стримера, их скорость уменьшается по мере продвижения от анода. В области анода величина скорости максимальна.

Сравнение результатов позволяет сделать вывод о том, что с увеличением величины  $(E/P)_{cp}$  для каждого значения давления скорость распространения стримера в фиксированных областях разрядного промежутка возрастает.

Для незамыкающих разрядный промежутков стримеров с увеличением  $(E/P)_{cp}$ , для фиксированного значения давления расстояние, проходимое стримером до его полной остановки, возрастает.

Максимальная скорость стримера для всех значений  $(E/P)_{cp}$  и для всех значений давления наблюдается в области игольчатого анода, и для фиксированного значения давления возрастает с ростом  $(E/P)_{cp}$ .

Для всех значений давления и при всех значениях  $(E/P)_{cp}$  на участке разрядного промежутка (~2 – 3 мм) от игольчатого анода наблюдается резкий спад скорости распространения стримера. После того, как фронт стримера выходит за пределы указанной области, скорость его распространения меняется значительно медленнее.

## Выводы

Получены зависимости скорости распространения стримера по разрядному промежутку при повышенных давлениях в воздухе.

Установлено, что скорость распространения стримера не постоянна вдоль разрядного промежутка, и имеет зависимость от величины давления.

Результаты экспериментов свидетельствуют о том, что с увеличением давления скорость стримера и его максимальная длина уменьшаются.

## Список литературы

1. Базелян Э.М., Райзер Ю.П. Искровой разряд. – М.: МФТИ, 1997. – 320 с.
2. Остроушко В.М., Пащенко І.А. Про параметри катодоспрямованого стримеру // Питання атомної науки і техніки. – 2006. – № 5, сер. «Плазменная электроника и новые методы ускорения». – С. 110-112.

Поступила в редколлегию 2.03.2007

Рецензент: д-р физ.-мат. наук, проф. В.И. Карась, ННЦ «Харьковский физико-технический институт» НАН Украины, Харьков.