

УДК 537.52, 533.933

А.В.Огинов, К.В.Шпаков, Е.В.Орешкин, С.А.Чайковский

Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН,
119991, Москва, Россия, Ленинский проспект, 53
e-mail: oginov@lebedev.ru

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НАЧАЛЬНОЙ ФАЗЫ АТМОСФЕРНЫХ РАЗРЯДОВ

Представлены результаты экспериментов по пробою длинных промежутков в воздухе при атмосферном давлении на установке ЭРГ (ФИАН). Зарегистрирована генерация рентгеновского излучения в виде однократных и множественных импульсов наносекундного диапазона с энергией квантов 5÷150 кэВ в различные моменты промежутка времени от начала подъема разности потенциалов и до развития основного разряда. Показано наличие предимпульсов тока, связанных с импульсами РИ. Нарастание генерации ближнего ультрафиолета 240÷400 нм происходит за 20 нс, и момент появления первого импульса РИ приходится на максимум УФ. Кадровая съемка начальной стадии разряда в видимом диапазоне показала рост стримера на формирующейся шаровидной области головки лидера.

Ключевые слова: развитие разряда, стример, лидер.

Введение

Работа направлена на выяснение механизма генерации жестких излучений в протяженных естественных разрядах в атмосфере. Вспышки рентгеновского излучения (РИ) с энергией квантов вплоть до 20 МэВ наблюдались в различных экспериментах, как с земли, так и с самолетов и шаров-зондов [1-5]. В настоящее время рассматривается несколько возможных механизмов генерации РИ, так или иначе связываемых с ускорением электронов до высоких энергий (так называемых убегающих электронов) в сильном электрическом поле в воздухе [6]. Убегание электронов с $E > 100$ эВ из высокоэнергетического хвоста теплового распределения происходит в поле выше критического ($E_c \sim 300$ кВ/см) в обычном механизме холодного пробоя на убегающих электронах (ПУЭ). Другой возможный механизм – пробой на релятивистских электронах [7], который может быть реализован в относительно слабом электрическом поле с порогом развития лавины убегающих электронов ($E_{rb} \sim 2.8$ кВ/см) более чем на порядок меньшем необходимого обычного пробоя в

воздухе ($E_i \approx 30$ кВ/см). Для его развития необходимы затравочные быстрые электроны с энергией от единиц кэВ, достаточные расстояния (сотни метров вблизи порога) и соответствующие разности потенциалов (десятки мегавольт) для развития процесса. В первом же случае затравочные электроны возникают естественным путем при ионизации газа на концах стримеров, но поле должно превышать обычное пробойное на порядок. Движение убегающих электронов в воздухе и взаимодействие с электродами сопровождается тормозным излучением.

В настоящей работе рассматривается длинная искра в воздухе как наиболее близкий лабораторный аналог высотного атмосферного разряда с возможностью приложения разности потенциалов на зазоре ~ 1 МВ и пространственных масштабах порядка десятков см [8-11]. За счет геометрии электродов при этом может быть обеспечена работа вблизи E_{rb} .

Экспериментальная техника и аппаратура

Эксперименты по пробою воздушных промежутков выполнялись на установке ЭРГ (ФИАН), с соответствующей доработ-

кой маслonaполненного генератора импульсных напряжений (ГИН), конструкции проходного масловоздушного изолятора на 1,5 МВ и коаксиальной электродной системы (ИСЭ СО РАН), адаптирующих установку под проводимый эксперимент [12]. ГИН собран по схеме Аркадьева-Маркса и состоит из 15 пар конденсаторов ИК-100-0,1 (полная запасаемая энергия 60 кДж). Узел нагрузки ГИН с проходным масловоздушным изолятором и выравнивающими сопротивлениями сконструирован защищенным от пробоев по поверхности вплоть до 3 МВ. Электродная система является аксиально-симметричной, с диаметром внешнего заземленного токопровода 2 м (см. рис. 1). Катодный электрод разрядного промежутка выполнен в виде дюралевого колпака, имеющего плоскую приосевую зону диаметром 320 мм и скругление периферийной части с $R=200$ мм. На фланец, закрывающий приосевую зону, устанавливался выносной шток со сменными электродами различных радиусов скруглений ($R=8\div 45$ мм). Анодный электрод устанавливался во фланце на оси системы, имеющем цанговый зажим для плавного изменения зазора за счет перемещения трубчатого штока. В качестве наконечника применялся тот же набор сменных электродов, что и для катода.

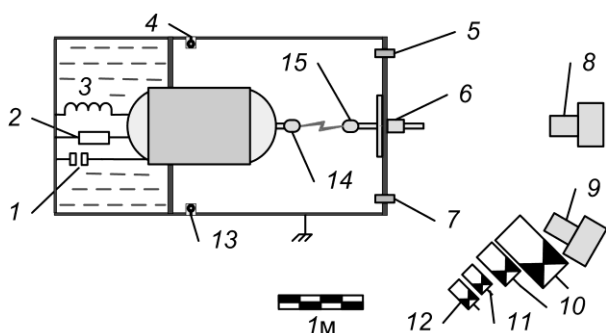


Рис. 1. Схема расположения диагностик: 1 – емкостный делитель, 2 – активный делитель, 3 – ввод от ГИН, 4, 13 – магнитные зонды, 5, 7 – пояса Роговского, 6 – анодный шунт, 8, 9 – интегральные фотокамеры, 10 – сцинтилляционные детекторы, 11 – детектор УФ излучения, 12 – ФЭУ на видимый свет, 14 – катод, 15 – анод.

Электрофизические диагностики включали осциллографирование токов

(анодный шунт, пояса Роговского), напряжения потенциального электрода (активный и емкостной делители), азимутального магнитного поля (магнитные зонды) с полосой пропускания 100-200 МГц (TDS 2014, TDS 2024).

Интегральная съемка разряда в оптическом диапазоне велась с нескольких ракурсов на цифровые фотоаппараты Canon 1000D объективами с $f=28\text{--}57$ мм с расстояния около 3 м от разряда при большом поле зрения ($\sim 1\text{--}2$ м). При съемке крупным планом с полем менее 0,5 м применялся Canon 1000D с объективом $f=80\text{--}250$ мм. В зависимости от светимости регистрируемого объекта (стримеры, сквозная фаза, главная стадия разряда, см. рис. 2а, б) и необходимого диапазона длин волн, применялись нейтральные и цветные фильтры из оптического стекла (ЗС-1, ЗС-2, ФС-1).

Регистрация рентгеновского, видимого и ультрафиолетового излучений с временным разрешением велась с использованием импульсных ФЭУ различных типов, состыкованных с соответствующими конструкциями детекторов на входном окне:

1. Для измерения рентгеновского излучения использовались пластиковые сцинтилляторы (полистирол с РОРОР), закрытые алюминием различной толщины для обрезания квантов с энергией менее 5 кэВ ($150\times 150\times 55$ мм³); 30 кэВ ($450\times 450\times 200$ мм³) по уровню 0,1. Торцы сцинтилляторов стыковались с входными окнами ФЭУ-30. Временное разрешение детекторов определялось временем высвечивания сцинтилляторов и составляло 10-15 нс (единичный импульс с фронтом и спадом по уровню 0,1). Время переноса электронов составляло 50-60 нс при напряжении питания $2,0\div 2,2$ кВ.

2. Видимое излучение с разрешением ~ 5 нс регистрировалось фотоумножителями ФЭУ-85 с оптоволоконным вводом излучения и набором фильтров. Время переноса электронов составляло 36-44 нс при напряжении питания $1,0\div 1,2$ кВ.

3. Ультрафиолетовое излучение регистрировалось ФЭУ типа Hamamatsu

R1463 с увиолевым окном. Фронт нарастания по уровням 0,1–0,9 составляет 2,4 нс. Время переноса электронов составляет 24 нс при напряжении питания 1,0 кВ. Для выделения поддиапазонов УФ-спектра применялись фильтры из увиолевого стекла (УФС1 – 240...400 нм, УФС2 – 270...380 нм, УФС3 – 320...390 нм, УФС4 – 340...390 нм). Для диапазона 280...400 нм также применяются ФЭУ-85.

Результаты и обсуждение

Серии экспериментов с регистрацией рентгеновского излучения с жесткостью квантов более 5 кэВ показали наличие в разрядах РИ в виде коротких импульсов, как одиночных, так и нескольких в одном выстреле (см. рис. 3). По результатам нескольких серий с общим количеством выстрелов ~300 отмечено, что импульсы РИ чаще всего привязаны к характерным местам на осциллограммах напряжения и тока. Например, самый ранний импульс РИ соответствует моменту уменьшения скорости роста напряжения с ≈ 7 кВ/нс до $\approx 3,5$ кВ/нс. Также наблюдаются импульсы РИ вблизи нарастания тока основного разряда (в конце спада напряжения), в последующих максимумах колебаний тока разряда. Но, наблюдаются и импульсы РИ в пределах «полки» напряжения на зазоре до основного разряда. Генерация РИ при нарастании основного тока до максимума, при осцилляции тока связана с эффектами колебаний и неустойчивостей в образовавшейся плазме, и не относится к механизму возникновения пробоя. Поэтому представляют интерес два основных типа импульсов РИ во временном диапазоне от начала роста напряжения и до максимума основного тока, описанные выше.

В серии импульсов, отличающихся только последовательно увеличивающимся напряжением, отмечено увеличение амплитуды первого импульса РИ с ростом крутизны переднего фронта напряжения. Амплитуда импульса РИ пропорциональна максимуму производной напряжения,

например, растет примерно в два раза при увеличении dU/dt с 4 кВ/нс до 8 кВ/нс.

Для определения моментов генерации импульсов РИ в предпробойной фазе проведены измерения анодного тока в этом интервале с двадцатикратным увеличением по амплитуде. Как показали эксперименты, особенности на переднем фронте напряжения соответствует предимпульс тока с крутым передним фронтом (<10 нс, определяемым полосой регистрации). Сам предимпульс тока обычно имеет двойную структуру: за первым узким пиком и амплитудой $\sim 100\div 400$ А следует относительно длинный колоколообразный второй максимум с амплитудой $200\div 300$ А. Возникающие импульсы РИ согласуются с особенностями предимпульса тока в пределах временного разрешения диагностик (~ 10 нс). С учетом «мертвого» времени ФЭУ, разной задержки сигнальных линий можно говорить о таких характерных местах возникновения импульса РИ в предпробойной стадии, как момент переполюсовки предимпульса тока перед последующим через $15\div 20$ нс резким передним фронтом предимпульса тока и второй максимум предимпульса тока через ~ 250 нс после фронта предимпульса.

Регистрация тока осциллографом с полосой пропускания 500 МГц показала наличие пика перед передним фронтом предимпульса за ~ 15 нс до первого максимума, который, в свою очередь, также увеличился за счет разрешения острой вершины. Амплитуда пика составляет $5\div 10\%$ амплитуды последующего нарастания тока предимпульса, длительность фронта которого уменьшилась до единиц наносекунд (для данной серии $4,8\pm 0,8$ нс по уровню 0,1-0,9). По результатам регистрации РИ с границей пропускания 5 кэВ и 30 кэВ оказалось, что импульс РИ, предвещающий передний фронт предимпульса тока, соответствует более жестким квантам, тогда как последующий импульс, вероятно, состоит из большего числа квантов меньшей энергии. Данный результат подтвержден

статистикой по серии ~ 100 выстрелов. Обычным является тот факт, что чем далее импульс отстоит от момента нарастания напряжения, тем меньший (быстро исчезающий на фоне шума) вклад он дает

в канале регистрации квантов > 30 кэВ. При этом сигналы, регистрируемые каналом > 5 кэВ, могут увеличиваться по амплитуде и длительности.

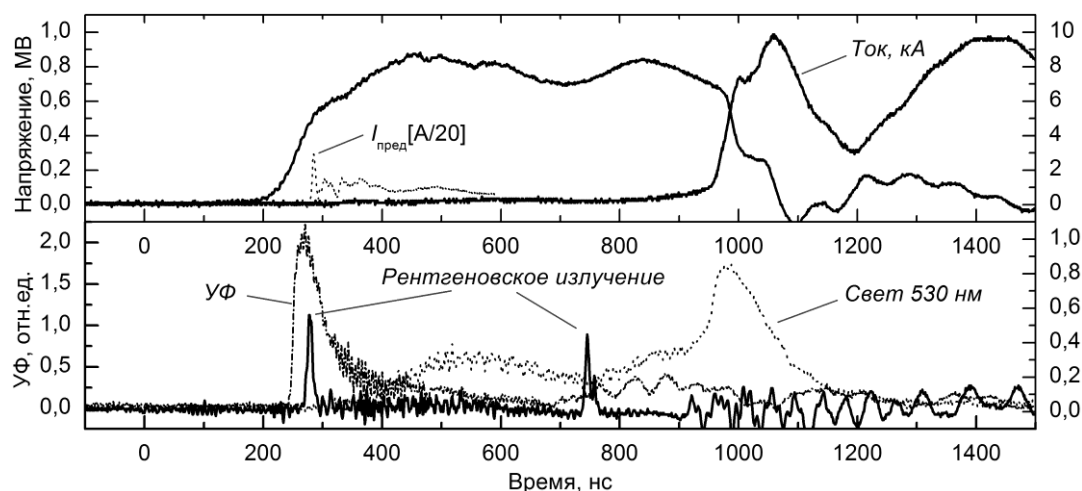


Рис. 2. Осциллограммы разряда в воздушном промежутке длиной 600 мм, с катодом радиусом 8 мм и анодом радиусом 20 мм при напряжении ГИН 900 кВ.

Регистрация ультрафиолета в диапазоне длин волн $240\div 400$ нм (рис. 2) показала нарастание генерации ближнего ультрафиолета за время ~ 20 нс, что меньше фронта нарастания напряжения. При этом момент генерации первого импульса РИ приходится на максимум УФ излучения. Длительность всего УФ-импульса превышает длительность рентгеновских импульсов. Временные характеристики ультрафиолета не совпадают с таковыми для видимого света. УФ-излучение не наблюдается в момент основного пробоя, когда свету в зеленой области спектра соответствует ярко выраженный максимум. Нет ультрафиолета и в первом максимуме видимого света, соответствующем максимуму пологой части предимпульса тока. Можно также отметить, что выход УФ излучения повторяется от выстрела к выстрелу с разбросом амплитуды на уровне $\pm 10\%$, что сравнимо с амплитудным разрешением применяемого ФЭУ.

С увеличением радиуса кривизны анода от $R=16$ мм до $R=45$ мм амплитуда первого максимума предимпульса тока возросла до $\sim 400\div 1200$ А. Это может быть связано как с увеличением эффективной поверхности анода, так и с динамикой

развития анодных стримеров. Рентгеновское излучение на переднем фронте предимпульса при этом также растет, появляются повторные импульсы, следующие с малым временным интервалом в пределах предимпульса тока. Кроме того, в единичных выстрелах наблюдались импульсы РИ существенно позже имеющих ярко выраженных первых максимумов предимпульсов тока. Это может объясняться наличием неосевых стримеров, которые успевают создать вклад в импульс тока, так и не достигнув условий генерации РИ. Съемка следов разрядов в видимом свете не противоречит данной гипотезе (см. рис. 3а). Сопоставление видимого количества каналов разряда с амплитудой тока в предимпульсе дало величину тока на единственный канал у анода на уровне $20\div 120$ А. С учетом ветвлений, наблюдаемых у части каналов разряда, диапазон токов сужается к нижнему пределу.

Проведенная кадровая ЭОП-съемка развития разряда с длительностью экспозиции 7 нс позволила увидеть развитие стримера (характерная форма, длина) в различные моменты времени относительно начала нарастания поля и оценить его

среднюю скорость. Характерные величины скоростей лежат в диапазоне от 10^6 см/с (на старте) до 10^8 см/с (в момент приближения к концу противоположного стримера).

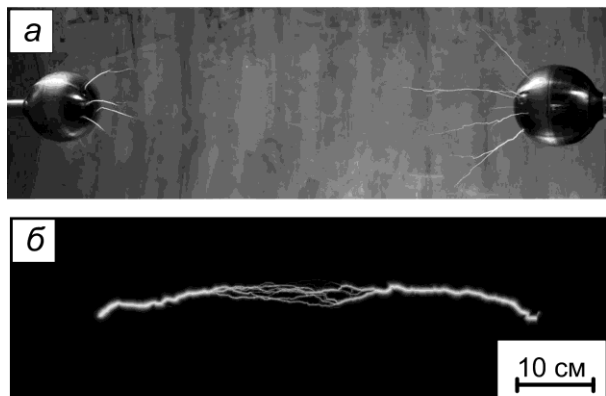


Рис. 3. *а* – развитие стримеров на 600-й нс от начала нарастания напряжения; *б* – интегральная съемка разряда (лидер).

Растущий канал разряда неравномерно светится по своей длине. Наиболее яркой областью растущего канала является своеобразная «головка» округлой формы с диаметром ~ 1 см. Со стороны, обращенной к аноду, видно менее яркое «острие» длиной $1 \div 8$ см.

Импульсы рентгеновского излучения зарегистрированы в различные моменты времени: на нарастающем напряжении вблизи максимума, в локальных максимумах предимпульса тока, в максимуме тока основного разряда, что по отдельности отмечалось в [8-11].

Наблюдаемое нами свечение в ультрафиолетовом и видимом диапазонах обусловлено предпробойными процессами в разрядном промежутке, а не является паразитной засветкой разрядников ГИН, как предполагается в [10]. Применение полностью экранированного от собственных излучений ГИН позволяет проводить более точные измерения непосредственно предпробойной стадии разряда, когда характерные токи и излучения меньше на 2–3 порядка. По-видимому, предполагаемое в работе [11] отсутствие прямой связи между видимым и рентгеновским излучениями, а также отсутствие временной привязки импульсов РИ к предразрядному току [9-11] связаны с применяемыми в работах открытыми воздушными ГИН. Свечение в ближнем ультрафиолетовом диапазоне, сопровождающее рентгеновские импульсы, может быть аналогом обнаруженным всплескам ультрафиолета в высотных атмосферных разрядах [13].

Авторы выражают благодарность А.В. Гуревичу и А.В. Агафонову за помощь в постановке задачи и в обсуждении результатов.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ (10-08-01283) и Учебно-Научного Комплекса ФИАН (программа поддержки научной молодежи).

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Fishman G.J., Bhat P.N., Mallozzi R. et al. // *Science*. – 1994. – V. 264. – P. 1313.
2. Базелян Э.М., Райзер Ю.П. // *Физика молнии и молниезащиты*. М.: Физматлит, 2001.
3. Dwyer J.R., Uman M.A., Rassoul H.K. et al. // *Science*. – 2003. – V. 299. – P. 694.
4. Dwyer J.R., Uman M.A., Rassoul H.K. et al. // *Geophys. Res. Lett.* – 2005. – V. 32. – L01803.
5. Tsuchiya H., Enoto T., Torii T. et al. // *Phys. Rev. Lett.* – 2009. – V. 102. – P. 255003.
6. Gurevich A.V., Zybin K.P. // *Physics-Uspekhi*. – 2001. – V. 44. P. 1119.
7. Gurevich A.V., Milikh G.M., Roussel-Dupre R. // *Phys. Lett. A*. – 1992. – V. 165. – P. 463.
8. Dwyer J.R., Rassoul H.K., Saleh Z. et al. // *Geophys. Res. Lett.* – 2005. – V. 32. – L20809.
9. Nguyen C.V., A.P.J.van Deursen, Ebert U. // *J. Phys. D: Appl. Phys.* – 2008. – V. 41. – P. 234012.
10. Rahman M., Cooray V., Ahmad N.A., et al. // *Geophys. Res. Lett.* – 2008. – V. 35. – L06805.

11. Dwyer J.R., Saleh Z., Rassoul H.K., Concha D., et al. // J. Geophys. Res. – 2008. – V. 113. – D23207.
12. Огинов А.В., Чайковский С.А., Богаченков В.А., Шпаков К.В. // Труды научной сессии НИЯУ МИФИ-2010. Москва, 2010, Т.2, с. 92; Oreshkin E.V., Chaikovsky S.A., Oginov A.V., Shpakov K.V. // Proc. of 16th Int. Symp. on High Current Electronics. Tomsk, 2010. P. 172.
13. Гарипов Г.К., Панасюк М.И., Тулупов В.И. и др. // Письма в ЖЭТФ. – 2005. – Вып. 84. – С. 204.

Стаття надійшла до редакції 30.05.2011

A.V.Oginov, K.V.Shpakov, E.V.Oreshkin, S.A.Chaikovsky
P.N.Lebedev Physical Institute of RAS, 119991 Moscow, Russia, Leninskii ave., 53
e-mail: oginov@lebedev.ru

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF INITIAL PHASE OF ATMOSPHERIC DISCHARGES

Experimental results on a breakdown of a long air gaps under atmospheric pressure in ERG installation (LPI) are presented. An x-ray generation in the form of single and multiple nanosecond scale pulses of 5÷150 keV quanta energies in different time instances before full breakdown is registered. The presence of current prepulse coupled with x-ray pulses is shown. The dependence of characteristic instances of discharge defined by electro physical measurements from instances of radiation bursts is shown. A generation growth of 240÷400 nm near ultraviolet in a 20 ns time interval is observed. The instance of first pulse of x-ray coincides with the UV maximum. Frame camera shots of initial stage of discharge in a visible spectral range shows a streamer growth on a developing sphere-like region of the leader head.

Key words: discharge development, streamer, leader.

О.В.Огінов, К.В.Шпаков, Є.В.Орешкін, С.А.Чайковський
Фізичний інститут ім. П.Н. Лебедева РАН, 119991, Москва, Росія, Ленінський проспект, 53
e-mail: oginov@lebedev.ru

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПОЧАТКОВОЇ ФАЗИ АТМОСФЕРНИХ РОЗРЯДІВ

Представлено результати експериментів по пробою довгих проміжків у повітрі при атмосферному тиску на установці ЕРГ (ФІАН). Зареєстрована генерація рентгенівського випромінювання у вигляді одиночних і багаточисельних імпульсів наносекундного діапазону с енергією квантів 5÷150 кеВ у різні моменти проміжку часу від початку підйому різниці потенціалів і до розвитку основного розряду. Показана наявність передімпульсів струму, пов'язаних з імпульсами РВ. Наростання генерації ближнього ультрафіолету 240÷400 нм відбувається за 20 нс, і момент появи першого імпульсу РВ припадає на максимум УФ. Кадрова зйомка початкової стадії розряду у видимому діапазоні показала ріст стримеру на шароподібній області, що формується в головці лідера.

Ключові слова: розвиток розряду, стример, лідер.