

04

Исследование энерговыделения в разрядной камере мультикамерной системы молниезащиты

© М.Э. Пинчук¹, А.В. Будин¹, И.И. Кумкова¹, А.Н. Чусов²

¹ Институт электрофизики и электроэнергетики РАН (ИЭЭ РАН),
Санкт-Петербург

² ОАО «НПО „Стример“», Санкт-Петербург
E-mail: pinchme@mail.ru

Поступило в Редакцию 17 ноября 2015 г.

Представлены экспериментальные данные о распределении энерговыделения по длине разрядной камеры мультикамерной системы молниезащиты в начальной стадии разрядного процесса, моделирующего импульс тока молнии амплитудой 10 кА. Мультикамерная система представляет собой последовательное соединение газоразрядных камер. На стадии пробоя между электродами, расположенными на дне канала камеры, формируется ударная волна. Последующее выделение энергии при развитии разряда происходит во всем объеме, ограниченном ударной волной.

Для молниезащиты воздушных линий передачи электроэнергии используются комплексы специальных устройств [1–3]. Основными элементами данных комплексов являются системы грозозащитных тросов [1–3], ограничители перенапряжений на основе нелинейных сопротивлений [2] и газовые разрядники различных типов [2,3]. Происходит непрерывное совершенствование защитных устройств всех типов [2–4] и модификация их компонентов. Разрабатываются новые подходы к обеспечению молниезащиты линий электропередачи [3,4].

В современных газоразрядных защитных устройствах используются различные виды разряда [3,5–9], разрабатываются новые методы для ограничения перенапряжения в линии электропередачи [3,5–9]. Например, появились газоразрядные управляемые разрядники со следящими системами [5–7]. Одними из наиболее перспективных грозозащитных элементов для построения молниезащитных комплексов являются системы мультикамерных разрядников (РМК) разработки ОАО НПО

„Стример“ [10], представляющие собой цепь последовательно соединенных двухэлектродных разрядных камер (КР), вмонтированных в профиль из силиконовой резины [3,8,9].

По своим техническим характеристикам эти устройства обеспечивают все современные требования, предъявляемые к молниезащите [11], и при проектировании и строительстве новых линий электропередачи во многих случаях отдается предпочтение данным типам устройств [3,10].

В данной работе представлены экспериментальные данные о распределении энерговыделения по длине разрядной камеры мультикамерной системы молниезащиты [9]. Разработка новых устройств молниезащиты остается весьма непростой и затратной задачей. Для оптимизации их проектирования в настоящее время предпринимаются попытки разработки физико-математических моделей разряда в таких системах и вычисления параметров среды в разрядной камере разрядника [12,13]. Стимулом к проведению настоящей работы послужило несоответствие результатов моделирования [13] и оценок [14] параметров течения газа с экспериментальными данными [14]. В работах [13,14] расчетные величины скорости распространения ударной волны значительно ниже наблюдаемых в эксперименте [14].

При ударе молнии в линию электропередачи происходит последовательный пробой разрядных промежутков в камерах мультикамерной системы между электродами, расположенными на дне каналов камер. На стадии пробоя формируется ударная волна, которая выталкивает значительную часть газа из разрядной камеры, и после прохождения импульса тока и снижения давления в разрядном объеме происходит обратное заполнение разрядной камеры воздухом. При этом скорость деионизации разрядного промежутка определяется скоростью обратного заполнения, которое, в свою очередь, зависит от того, какое количество газа покинуло камеру.

Таким образом, параметры ударной волны и течения газа в начальный период развития разряда в большой степени определяют характеристики работы данного защитного устройства и его способность к гашению сопровождающего тока из линии электропередачи.

Эксперименты проводились на стенде, детальное описание которого представлено в [15]. Краткий обзор методов диагностики в [16]. Исследовался разряд через одну разрядную камеру мультикамерной системы [9].

На рис. 1, а представлен эскиз разрядной камеры мультикамерной системы. Камера изготовлена из силиконовой резины. Разрядный объем

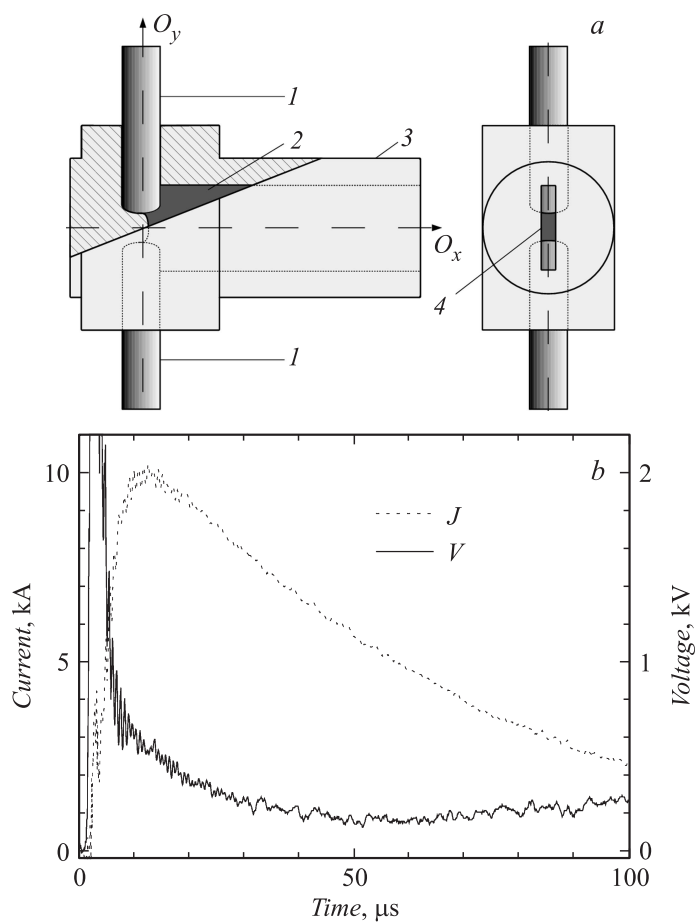


Рис. 1. Эскиз разрядной камеры (а) мультикамерной системы и осциллограммы (b) тока и напряжения: 1 — электрод, 2 — разрядный объем, 3 — корпус разрядной камеры, 4 — сечение выхлопного участка разрядного объема, J — ток, V — напряжение.

представляет собой узкий щелевой канал прямоугольного сечения, открытый с одной стороны в атмосферу: высота щели 1 см, ширина 0.1 см, длина разрядного объема 2 см.

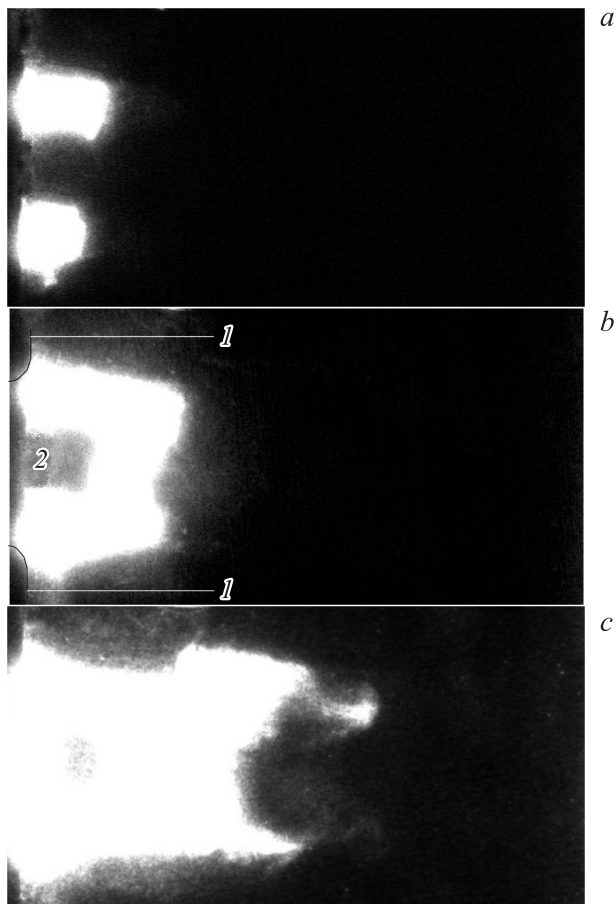


Рис. 2. Скоростное фото канала разряда через $3\ \mu\text{s}$ (*a*), $5\ \mu\text{s}$ (*b*) и $10\ \mu\text{s}$ (*c*) после инициирования разряда: 1 — контур электродов, 2 — диэлектрический выступ на дне разрядного объема.

Осциллограммы тока и напряжения для разрядного промежутка представлены на рис. 1, *b*. Для формирования импульса тока с амплитудой $10\ \text{kA}$, с начальной скоростью нарастания тока $\sim 10^9\ \text{A/s}$ использовался конденсатор емкостью $30\ \mu\text{F}$. Зарядное напряжение емкости

лежало в пределах 18–23 kV. Емкость разряжалась на одну разрядную камеру через резистор сопротивлением 2Ω . Таким образом, амплитуда тока определялась величиной резистора, постоянная времени разрядной цепи была $\sim 60\mu\text{s}$. Энерговклад в разряд составлял $\sim 200\text{J}$.

Последовательные кадры скоростной фотосъемки в боковой проекции развития разряда в моменты времени 3, 5 и $10\mu\text{s}$ представлены на рис. 2. Экспозиция каждого кадра 15ns . Для проведения съемки в боковой проекции корпус разрядной камеры был срезан до границы с разрядной щелью и на месте стенки был жестко зафиксирован лист из прозрачного поликарбоната.

Плоская геометрия разрядной щели позволяет восстановить поле энерговыведения в разрядном объеме по данным скоростной фотосъемки.

Для исследуемого объекта плотность газовой среды $\rho \sim 1.2\text{kg/m}^3$, характерный размер области течения $L \sim 2 \cdot 10^{-2}\text{m}$, поперечное сечение потока $S \sim 10^{-5}\text{m}^2$, характерный энерговклад в начальный период $W_{in} \sim 10\text{--}25\text{J}$.

При пробое межэлектродного промежутка и последующем формировании канала разряда энергия $W_{in} \sim 10\text{--}25\text{J}$ вкладывается в течение нескольких микросекунд в относительно малую область. Формируется фронт ударной волны.

При массе газа в камере $m \sim 0.25\text{mg}$, если энергию W_{in} вложить во всю массу газа, то параметры газа будут такими: $p \sim 7\text{--}15\text{MPa}$, $T \sim 10\,000\text{--}20\,000\text{K}$. Скорость звука при этом $c \sim 2.5\text{--}4\text{km/s}$. При таких параметрах можно считать плазму прозрачной, это допустимо на ранних стадиях до массивованного поступления материала стенок камеры в разрядный объем и учитывая относительно небольшие плотности тока $\sim 10^4\text{A/cm}^2$.

Оценка средней скорости истечения (КПД истечения $\chi \sim 0.5$) дает из выражения

$$\rho SL \frac{v^2}{2} \sim \chi W_{in} \text{ скорость } v \sim 0.5 \left(\frac{2\chi W_{in}}{\rho SL} \right)^{1/2} \quad 3\text{--}7\text{km/s.}$$

Оценим характерные времена теплопередачи: $L^2/4a \sim 0.1\text{s}$, $l^2/4a \sim 250\mu\text{s}$, где температуропроводность воздуха $a \sim 10^{-3}\text{m}^2/\text{s}$ и размеры фронта волны $l \sim 10^{-3}\text{m}$. Таким образом, можно считать, что

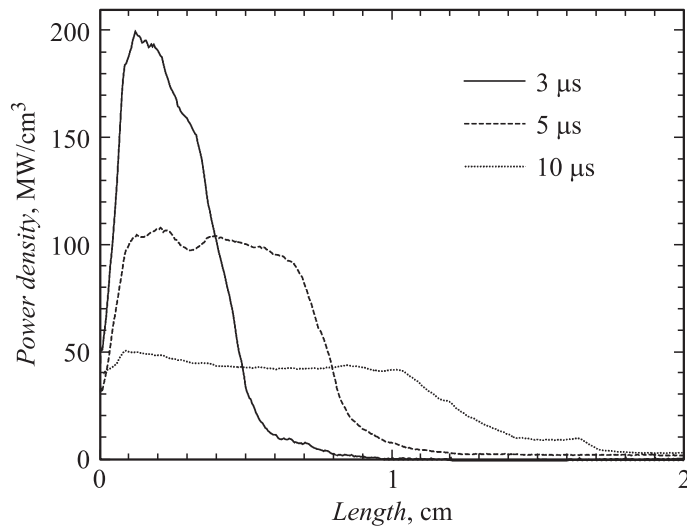


Рис. 3. Распределения выделения энергии вдоль оси Ox разрядной камеры в моменты времени 3, 5 и $10 \mu\text{s}$ после инициирования разряда.

тепло переносится вместе с потоком газа и явления переноса можно не учитывать.

Скоростная фотосъемка велась в относительно узком спектральном диапазоне 550–650 nm, ограниченном оптическими фильтрами. Для проведенной оценки температуры плазмы в заданном спектральном диапазоне спектральная излучательная способность линейно пропорциональна температуре $I_\lambda \sim T$ [17]. Таким образом, считая, что локальное энерговыделение в данной точке пространства идет на увеличение температуры с точностью до кинетической энергии газа, оптическое изображение отражает поле энерговыделения для плоской геометрии разрядного объема:

$$P(t) = J(t)V(t) = \iint P_{xy}(x, y, t) dx dy \Delta z \sim \iint I_\lambda(x, y, t) dx dy,$$

где $P(t)$ — мощность, вкладываемая в разряд, $J(t)$ — ток, $V(t)$ — напряжение на разрядном промежутке, $P_{xy}(x, y, t)$ — пространственное распределение удельной мощности в плоской геометрии, Δz — ширина

щели разрядного объема, $I_\lambda(x, y, t)$ — поле интенсивности излучения из разрядного промежутка в заданный момент времени. Поле $I_\lambda(x, y, t)$ фактически соответствует распределению интенсивности на изображении скоростного фото разряда в заданный момент времени.

По скоростным фотографиям можно восстановить двумерные поля энерговыделения в разрядном объеме. Но в данном случае более показательны одномерные распределения энерговыделения $P_x(x, t)$ вдоль оси Ox разрядной камеры (рис. 3):

$$P_x(x, t) \sim \int I_\lambda(x, y, t) dy.$$

Видно, что выделение энергии при развитии разряда происходит во всем объеме, ограниченном ударной волной. При съемке в боковой проекции поле излучения занимает все пространство от дна разрядной камеры до движущегося фронта ударной волны.

Таким образом, ударная волна во время своего движения получает дополнительную энергию от разряда. Данный вывод подтверждает предположения работы [14]. Представленные данные можно учитывать при разработке и корректировке физико-математических моделей разряда в подобных электроразрядных системах.

Работа выполнена в рамках программы „Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы“ по соглашению № 14.579.21.0041 от 21.08.2014 года. Уникальный идентификатор прикладных научных исследований (проекта) RFMEFI57914X0041.

Список литературы

- [1] *Базелян Э.М., Райзер Ю.П.* Физика молнии и молниезащиты. М.: Физматлит, 2001. 320 с.
- [2] *Александров Г.Н.* Молния и молниезащита. М.: Наука, 2008. 280 с.
- [3] *Подпоркин Г.В.* Молниезащита воздушных линий электропередачи. СПб.: Родная Ладога, 2015. 176 с.
- [4] *Кольчев А.В., Попова Ю.С., Халилов Ф.Х.* // ЭЛЕКТРО. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. 2009. № 5. С. 20–23.
- [5] *Yao Xueling, Chen Jingliang, Xu Xiaowei, Liu Yong, Zhao Yong* // Plasma Sci. Technol. 2010. V. 12. P. 113–117.

- [6] Sun W., Li Y., Lu D., Zhao X., Yu Y. // Adv. Mater. Res. 2012. V. 368–373. P. 3344–3347
- [7] Yao Xueling, Chen Jingliang // Plasma Sci. Technol. 2012. V. 14. P. 759–765.
- [8] Подпоркин Г.В., Енькин Е.Ю., Пильщиков В.Е. // Электротехника. 2013. № 1. С. 2–7.
- [9] Подпоркин Г.В., Енькин Е.Ю., Пильщиков В.Е. // Электричество. 2013. № 1. С. 26–32.
- [10] <http://www.streamer.ru/>; карта установленных изделий: <http://map.streamer.ru/>
- [11] IEC61024. 1990. Protection of structures against lightning. Part 1: General principles. International Electrotechnical Commission (IEC) Std.
- [12] Фролов В.Я., Иванов Д.В., Мурашов Ю.В., Сиваев А.Д. // Письма в ЖТФ. 2015. Т. 41. В. 7. С. 8–15.
- [13] Guo Zhiwei, Long Xinping, Qian Zhongdong, Qiu Ning / 2016. Частное сообщение.
- [14] Глушнев А.В., Савельев А.С., Сон Э.Е., Терешонок Д.В. // ЖТФ. 2015. Т. 85. В. 3. С. 153–155.
- [15] Пинчук М.Э., Будин А.В., Пильщиков В.Е., Лекс А.Г., Леонтьев В.В. // Приборы и техника эксперимента. 2016 (в печати).
- [16] Pinchuk M.E., Bogomaz A.A., Budin A.V., Rutberg P.G. // IEEE Transactions on Plasma Science. 2014. V. 42. N 10. October. P. 2434–2435.
- [17] Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. М.: Наука, 1966. 688 с.