

В. И. ЧУМАКОВ, канд. физ.-мат наук, М. А. ОСТРИЖНОЙ,  
Ю. Я. ВОЛКОЛУПОВ, канд. физ.-мат. наук, М. А. КРАСНОГОЛОВЕЦ, докт. физ.-мат. наук,  
В. М. ВАНЦАН, канд. физ.-мат. наук, В. Г. НЕСТЕРЕНКО, О. И. ХАРЧЕНКО

### ВИЗУАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ВЫСОКОВОЛЬТНОГО РАЗРЯДА В АТМОСФЕРЕ

Высоковольтные разряды в атмосфере, возбуждаемые с помощью генераторов импульсного напряжения (ГИН) с выходной амплитудой порядка сотен киловольт, являются источниками мощного излучения, спектр которого расположен как в радиочастотном диапазоне длин волн, так и в оптическом диапазоне. Визуальные исследования позволяют установить некоторые характеристики излучения, а также косвенно определить ряд особенностей процесса разряда и установить оптимальные параметры формирующих экспериментальных установок. В работе приведены некоторые результаты исследований характеристик высоковольтного разряда в атмосфере, возникающего на выходе ГИНа при  $U \sim 500$  кВ в режиме искрового пробоя межэлектродного зазора и при нагружении ГИНа электровзрывающимся проводником (ЭВП). Получены разряды ЭВП длиной свыше 1 м и исследованы зависимости импульса тока разряда от нагрузки и плотности энергии излучения от материала ВП.

Экспериментальная установка (рис. 1) представляет собой ГИН колончатого типа, выполненный по 10-каскадной схеме умножения напряжения Аркадьева-Маркса [1]. Максимальное выходное напряжение составляет 600 кВ при начальном энергозапасе 3,8 кДж. Разряд формировался в атмосфере между выходными остриями электродами (1 и 2 на рисунке) в режиме непосредственного пробоя либо канализировался с помощью ЭВП (при этом электроды снимались). Ток разряда регистрировался поясом Роговского. Оптическое излучение разряда регистрировалось измерителем ИМО-2Н в широкой полосе 0,3-10,2 мкм и в отдельных диапазонах спектра с помощью набора светофильтров.

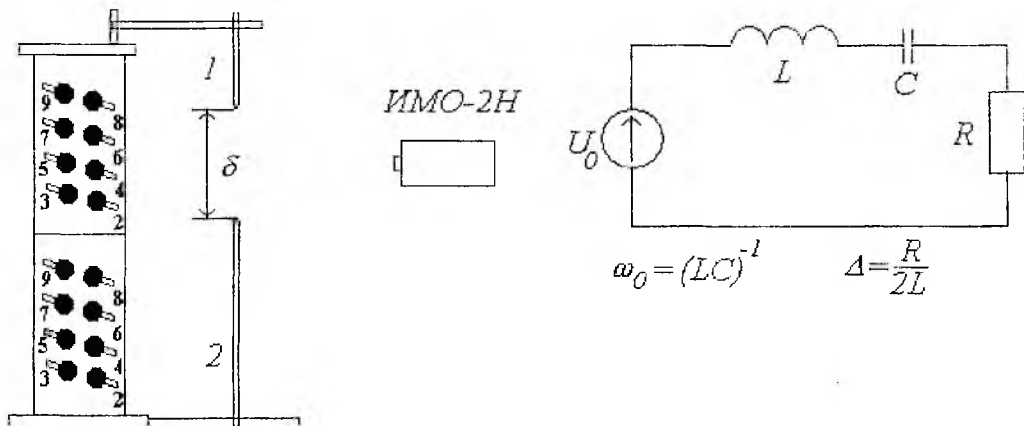


Рис.1

Временные диаграммы тока ГИНа приведены на рис. 2. Как видно, в режиме искрового разряда между остриями электродами процесс носит колебательный характер с частотой осцилляций  $\sim 800$  кГц. Затухание  $\Delta$  эквивалентного контура разрядной цепи достаточно мало, чтобы обеспечить медленный спад амплитуды колебаний тока. Такой процесс вообще характерен для разряда ГИНа. [1, 2].

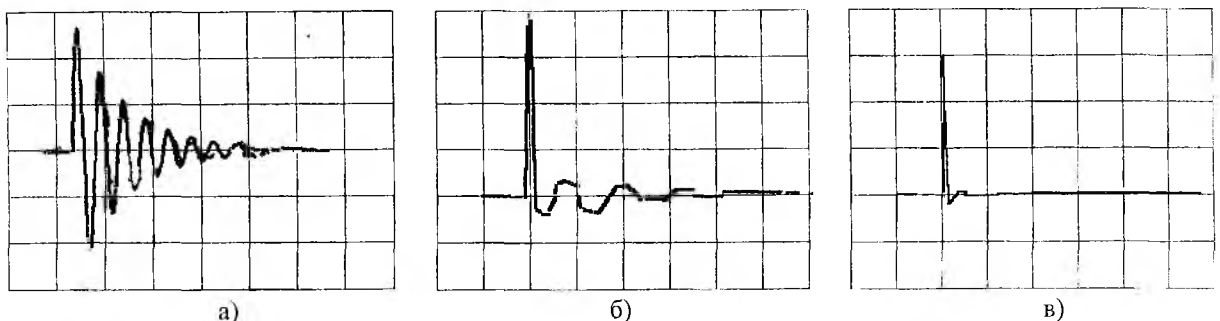


Рис.2

а – остийные электроды 2 кА/дел, 10 мкс/дел, б – медь 5 кА/дел, 5 мкс/дел; в – вольфрам 10 кА/дел, 5 мкс/дел

Картина изменения тока во времени при электровзрыве проводника существенно отличается (рис.2, б, в). Происходит увеличение первого импульса тока и заметный спад амплитуды осцилляций. Такой режим разряда не вписывается в рамки линейной модели колебательного контура и может быть объяснен с помощью схемы, включающей нелинейные элементы: сопротивление и индуктивность (рис. 1). Зависимость тока от параметров ЭВП видна из сравнения рис.2, б и в. Использование ЭВП из вольфрама диаметром 0,04 мм приводит к дальнейшему укорочению импульса тока и повышению его амплитуды. Одновременно разряд принимает аperiodический характер.

Фотографии разряда ГИНа через оптические фильтры приведены на рис.3. При искровом пробое разряд представляет характерную картину одноканального или многоканального процесса, форма и размеры которого зависят от конфигурации электродов, зазора и приложенного напряжения [3]. Использование ВП приводит к стабилизации формы разрядной области и позволяет значительно увеличить разрядный промежуток. Расстояние между электродами на рис. 3, а, б составляет 25 см, длина проводника на рис. 3, в, г равна 124 см.

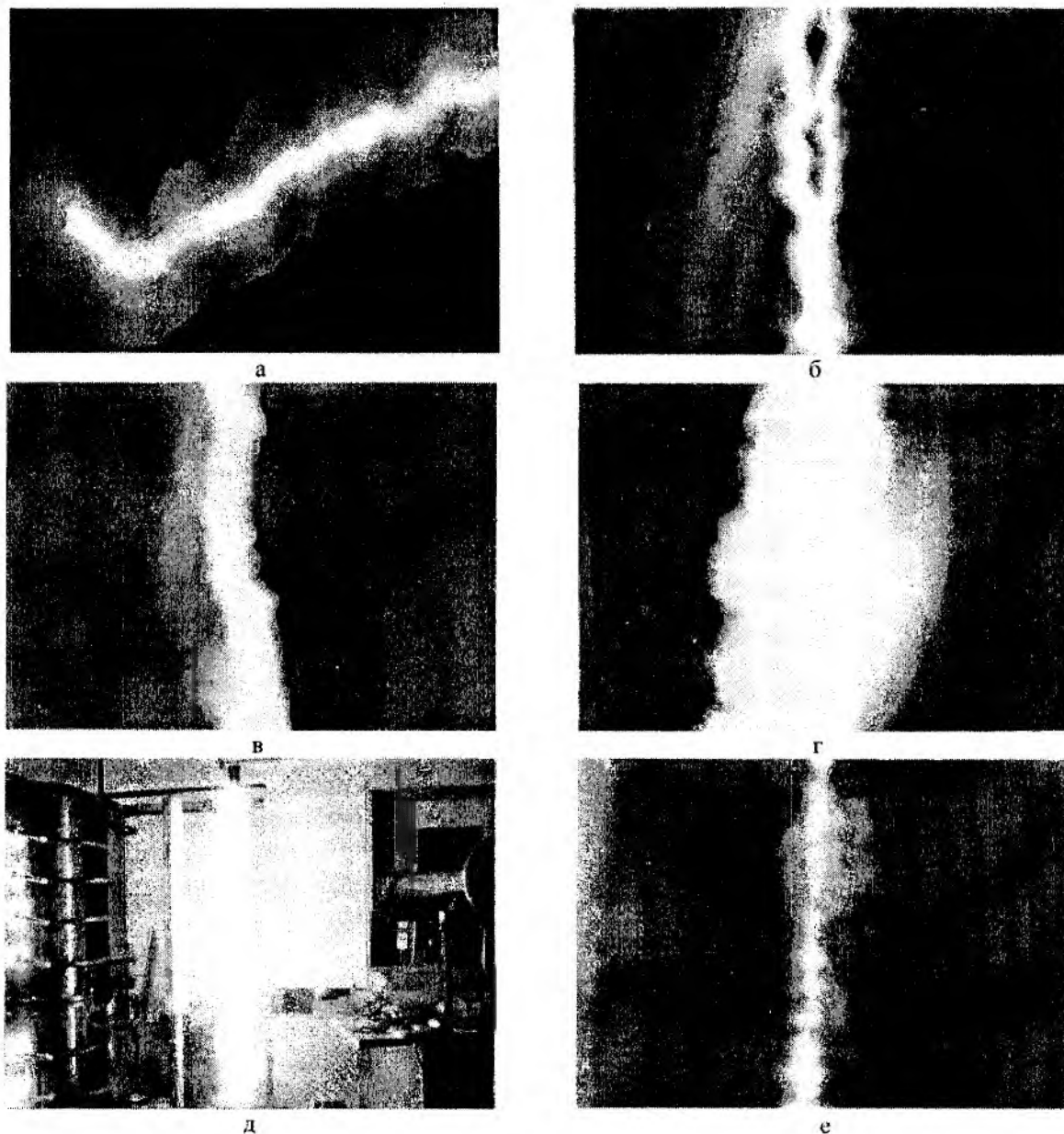


Рис.3.

а – искровой разряд, фильтр ЖЗС-17; б – искровой разряд, фильтр УФС-8;  
 в – искровой разряд, фильтр ТС-10; г – взрывающийся проводник Си, фильтр КС-17,  
 д – взрывающийся проводник W, фильтр НС-10; е – взрывающийся проводник W, фильтр УФС-8

Применение при фоторегистрации оптических фильтров позволяет наблюдать пространственное распределение температуры в разрядном канале и оценить размеры отдельных температурных областей [4]. Как правило, выделяются 4 основные температурные области разряда. Наиболее разогретая область разряда расположена в центре и имеет диаметр не более 1 мм (рис.3, а, в). Окружающая плазменная шуба примыкает к высокотемпературной области и имеет поперечный размер порядка диаметра электрода. Внешняя грубчатая оболочка имеет толщину кольца порядка 1 мм и располагается аксиально высокотемпературному каналу. Некоторые участки разрядного канала окружены низкотемпературными несимметричными оболочками. При использовании низкочастотного фильтра область разряда выглядит однородной и области с различной температурой не разрешаются (рис. 3, г).

В табл.1 приведены показатели значений плотности потока энергии оптического излучения разряда в различных диапазонах спектра. Различия в величинах энергии излучения при использовании ЭВП из проводников с различными сечениями показывают, что параметры плазмы в разрядном канале определяются, в основном, проводником, а не атмосферой.

Таблица 1

Нагрузка ГИНа/ материал	Величина зазора $\delta$ , см	Поток энергии излучения, мДж/см			
		Без фильтра	Фильтр УФС-6	Фильтр ФС-6	Фильтр КС-17
Межэлектродный зазор <sup>1)</sup>	25	3,5	1,5	0	0
ВП/Cu <sup>2)</sup>	124	4,0	0	0	0
ВП/W <sup>2)</sup>	124	7,5	0	1,0	1,5

Примечание: <sup>1)</sup> на расстоянии 0,75 м;  
<sup>2)</sup> на расстоянии 1,35 м.

Для определения энергии, вводимой в разрядный канал при использовании ЭВП, запишем закон Джоуля-Ленца

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = \frac{1}{\sigma} j^2, \quad (1)$$

где  $Q$  – удельная энергия в проводнике;  $\sigma$  – проводимость проводника;  $j$  – плотность тока в разрядном канале.

Температурная зависимость проводимости металлов до температуры испарения аппроксимируется выражением [5]

$$\sigma = \frac{\sigma_0}{1 + \beta Q}, \quad (2)$$

где  $\sigma_0$  – удельная проводимость металла при нулевой температуре;  $\beta$  – температурный коэффициент проводимости. Подставив равенство (2) в (1) и решив, получим

$$1 + \beta Q = \exp\left(\frac{\beta}{\sigma_0} \int_0^t j^2 dt\right). \quad (3)$$

С учетом выражения (3) энергия, введенная в проводник, равна

$$W_{np} = Q \pi r^2 l_{np} = \frac{\pi r^2 l_{np}}{\beta} \left[ \exp\left(\frac{\beta}{\sigma_0} I\right) - 1 \right], \quad (4)$$

где  $r$  – радиус проводника;  $l_{np}$  – длина проводника;  $I = \int_0^t j^2 dt$  – интеграл тока, значения которого

приведены, например, в [5]. Результаты расчета энергии, введенной в разряд, показаны в табл.2. Как видно, полученные результаты соответствуют условию эффективного электровзрыва проводника  $W_{np} \cong (2 \div 3) W_{субл}$ , где  $W_{субл}$  – энергия сублимации материала [6].

Таблица 2

Материал	Длина проводника, м	Радиус проводника, мкм	Проводимость ( $\cdot 10^{-6}$ ), (Ом $\cdot$ м) <sup>-1</sup>	Уд. энергия сублимации ( $\cdot 10^{-5}$ ), Дж/кг	Температурный коэффициент ( $\cdot 10^9$ )	Интергал тока ( $\cdot 10^{-17}$ ), А <sup>2</sup> с/м <sup>4</sup>	Энергия, введенная в проводник, Дж
Al	1,25	50	39,2	105	2,15	1,09	1801
Cu	1,25	50	63,3	58,2	1,31	1,95	4164
W	1,25	20	18,2		-	-	-

Проведенные исследования показывают возможность применения методики визуализации сильноточного оптического разряда при исследованиях высоковольтных разрядов в атмосфере. Разработан и создан экспериментальный макет для проведения исследований плазмы в атмосфере, возникающей при искровом пробое длинных промежутков и при взрыве металлического проводника. Полученные результаты могут быть использованы для укорочения длительности высоковольтных импульсов, являющихся источниками короткоимпульсного излучения, а также в ускорителях, предназначенных для возбуждения мощных источников излучения ультракороткой длительности.

**Список литературы:** 1. Смирнов С.М., Терентьев П.В. Генераторы импульсов высокого напряжения. М.-Л.: Энергия, 1964. 239 с. 2. Ашнер А.М. Получение и измерение импульсных высоких напряжений: Пер. с нем. М.: Энергия, 1979. 166 с. 3. Мик Дж., Крэгс Дж. Импульсный пробой в газах. М.: Изд-во иностр. лит, 1960. 605 с. 4. Экспериментальные исследования сильноточного разряда магнитоплазменного компрессора в атмосфере / Чумаков В.И., Острижной М.А., Волколупов Ю.А., Ванцан В.М., Нестеренко В.Г., Харченко О.И. // Радиотехника. Всеукр. межвед. научн.-техн. сб. 2000. Вып. 115. С. 106-110. 5. Кнопфель Г. Сверхсильные импульсные магнитные поля. М.: Мир, 1972. 392 с. 6. Столович Н.Н., Максимов В.Г., Минацкая Н.С. Об одной упрощенной модели начальной стадии электрического взрыва медного проводника // ЖТФ. 1974. Т.44. Вып.10. С.2132-2145.

Харьковский государственный технический университет радиозлектроники

Поступила в редколлегию 17.07.2000