

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СИЛЬНОТОЧНОЙ ДУГИ ОТКЛЮЧЕНИЯ С ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ МАТЕРИАЛАМИ

© 2012 г. В. П. Базилевский, Ю. Г. Гендель,  
И. С. Глушков, Ю. А. Кареев, В. П. Новиков

ГНЦ РФ “Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований”

Россия, 142190, Троицк Московской обл., ул. Пушкиновых, владение 12

Поступила в редакцию 14.07.2011 г.

Приведены технические решения для моделирования коммутационных процессов в сильноточных размыкателях и результаты экспериментальных исследований по взаимодействию дуги отключения с диэлектрическими материалами в дугогасительной камере, в которую дуговой разряд транспортируется рельсотроном.

### ВВЕДЕНИЕ

Одной из важных характеристик мощных размыкающих устройств является время восстановления электрической прочности (в.э.п.) межконтактного промежутка при их срабатывании. Для сокращения времени в.э.п. и ускорения процесса дугогашения применяются различные методы и устройства, нашедшие свое воплощение в конструкциях мощных размыкателей [1–3]. Нами исследовались процессы в сильноточной дуге отключения при ее взаимодействии с диэлектрическими материалами. Основной целью работы явилось исследование динамических характеристик дуги отключения и поиск диэлектрических материалов, обеспечивающих наибольшую эффективность дугогашения.

### ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТА

В основу постановки экспериментальных исследований положен принцип работы выключателя [4] с отводом дуги отключения из межконтактной области в камеру дугогашения (КД) рельсотроном. Принципиальная схема электрофизической установки приведена на рис. 1. С момента запуска разрядника и формирования импульса тока с длительностью полупериода  $T_0/2 = 8$  мс инициирование дуги осуществляется путем быстрого (0.3 мс) испарения медной проволоки диаметром 0.13 мм. Схема размещения медной проволоки и магнитных зондов в рельсотроне показана на рис. 2 и 3.

Ток в цепи (пояс Роговского), напряжение дуги (дифференциальный пробник DP-50) и сигналы с магнитных зондов регистрировались цифровыми осциллографами GDS-71022. Для визуализации дуги в процессе перемещения и определения ее скорости на выходе рельсотрона использовался фоторегистратор СФР.

На рис. 4 приведены характерные осциллограммы тока в цепи рельсотрона и напряжения на рельсотроне. Отрицательное напряжение, возникающее на рельсотроне по окончании полупериода, обусловлено перераспределением напряжения на конденсаторной батарее между емкостями разрядника и рельсотрона.

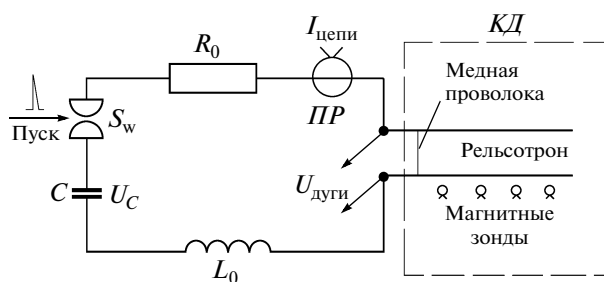


Рис. 1. Принципиальная схема электрофизической установки.  $C$  – конденсаторная батарея емкостью 57.6 мФ;  $U_C = 0–5$  кВ;  $S_w$  – вакуумный разрядник;  $R_0 = 13.6$  МОм – начальное сопротивление цепи;  $PP$  – пояс Роговского;  $L_0 = 0.1126$  мГн – начальная индуктивность контура;  $КД$  – камера дугового разряда.

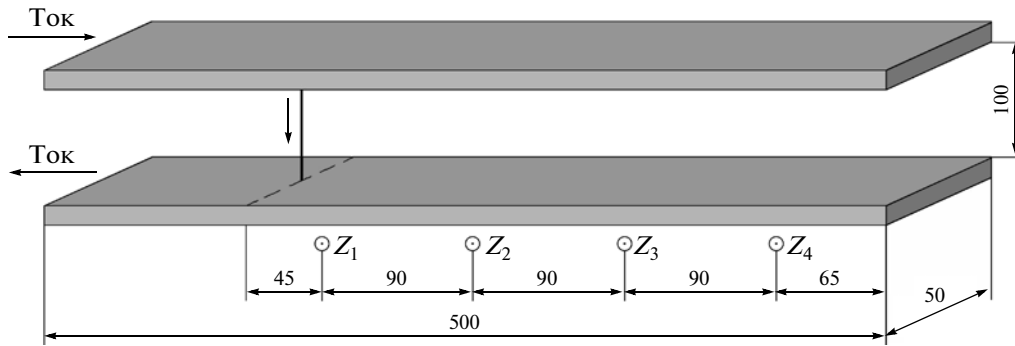


Рис. 2. Условная схема рельсотрона.  $Z_1$ – $Z_4$  – магнитные зонды на стеклотекстолитовой планке.

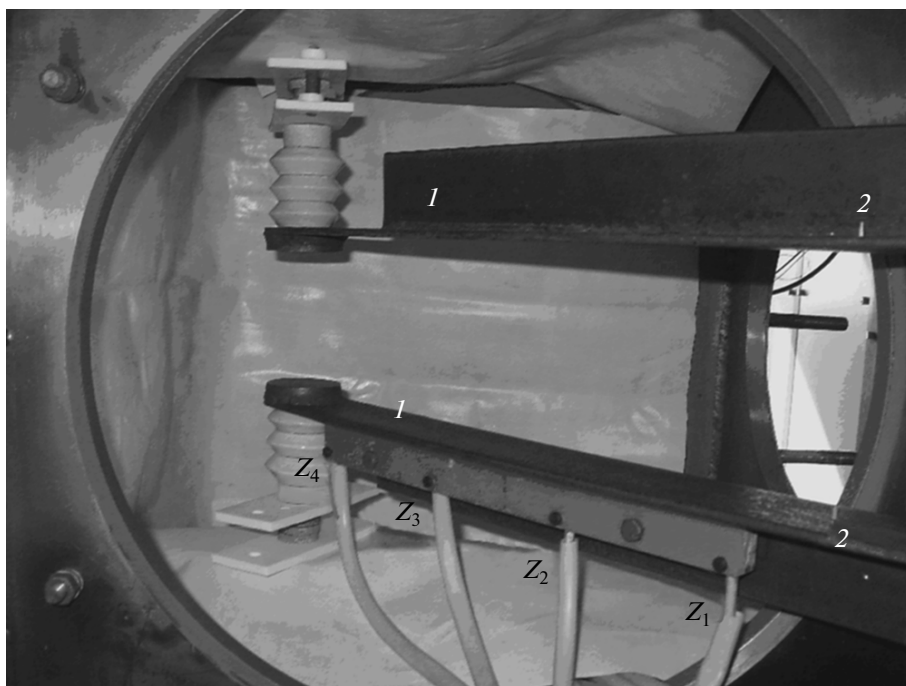


Рис. 3. Внешний вид рельсотрона в камере дугогашения. 1 – рельсы; 2 – место установки медной проволоки.

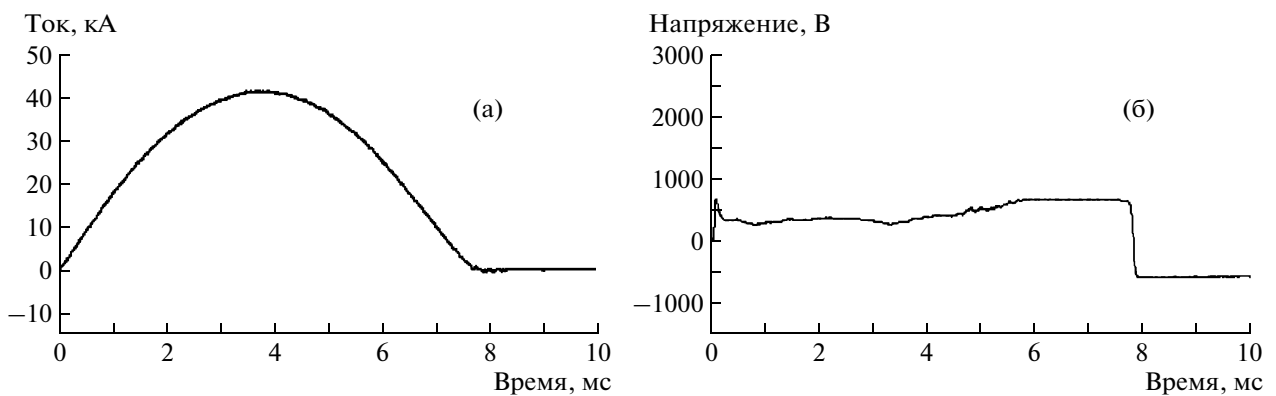


Рис. 4. Осциллограммы тока (а) в цепи рельсотрона и напряжения (б) на рельсотроне.

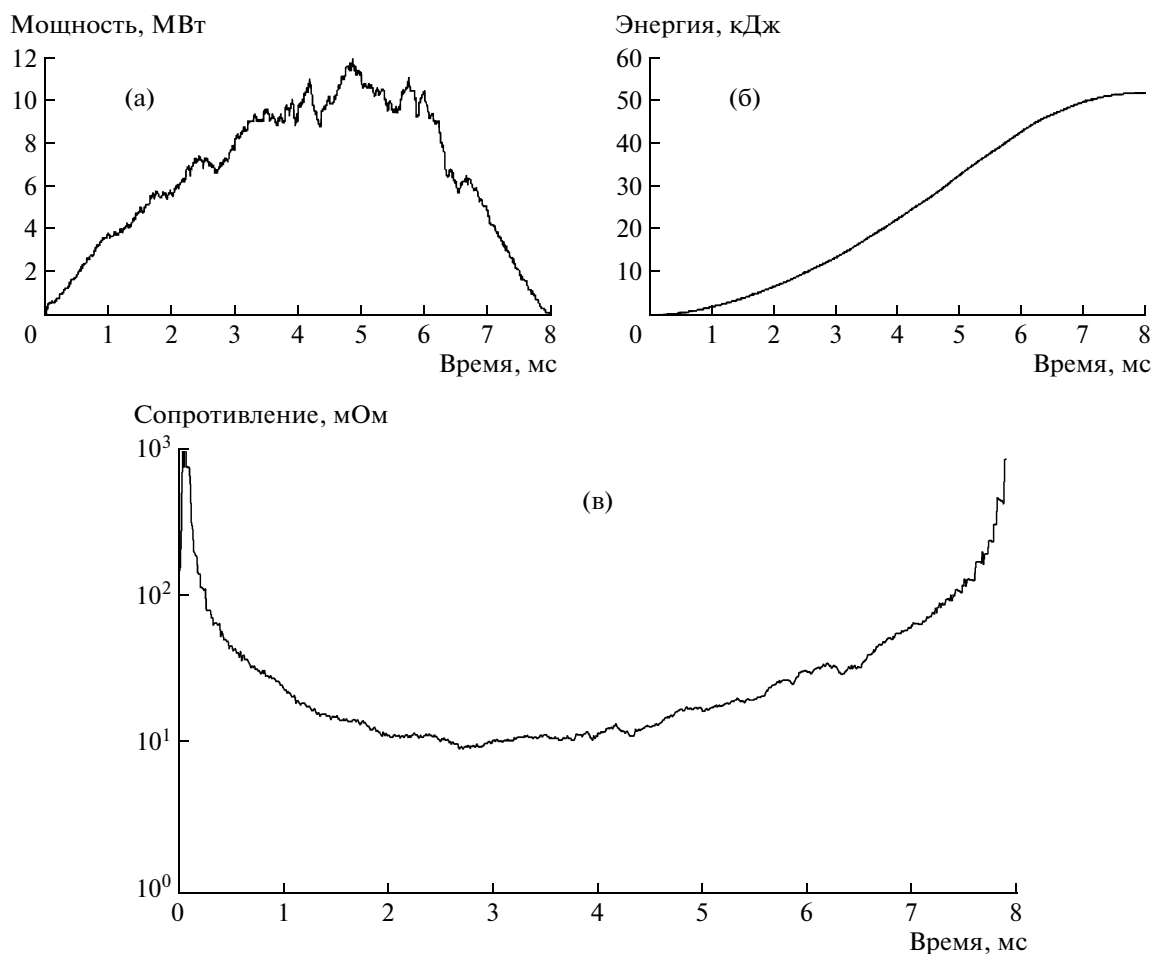


Рис. 5. Изменение во времени электрической мощности (а), энергии (б) и сопротивления (в) дуги.

На рис. 5 показаны изменения во времени электрической мощности, энергии и сопротивления дуги.

#### ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДУГИ В РЕЛЬСОТРОНЕ

Движение проводника с током (дуги отключения) в рельсотроне описывается уравнениями:

$$\frac{d}{dt}(MV) = \frac{1}{2} L' I^2, \quad (1)$$

$$dZ/dt = V, \quad (2)$$

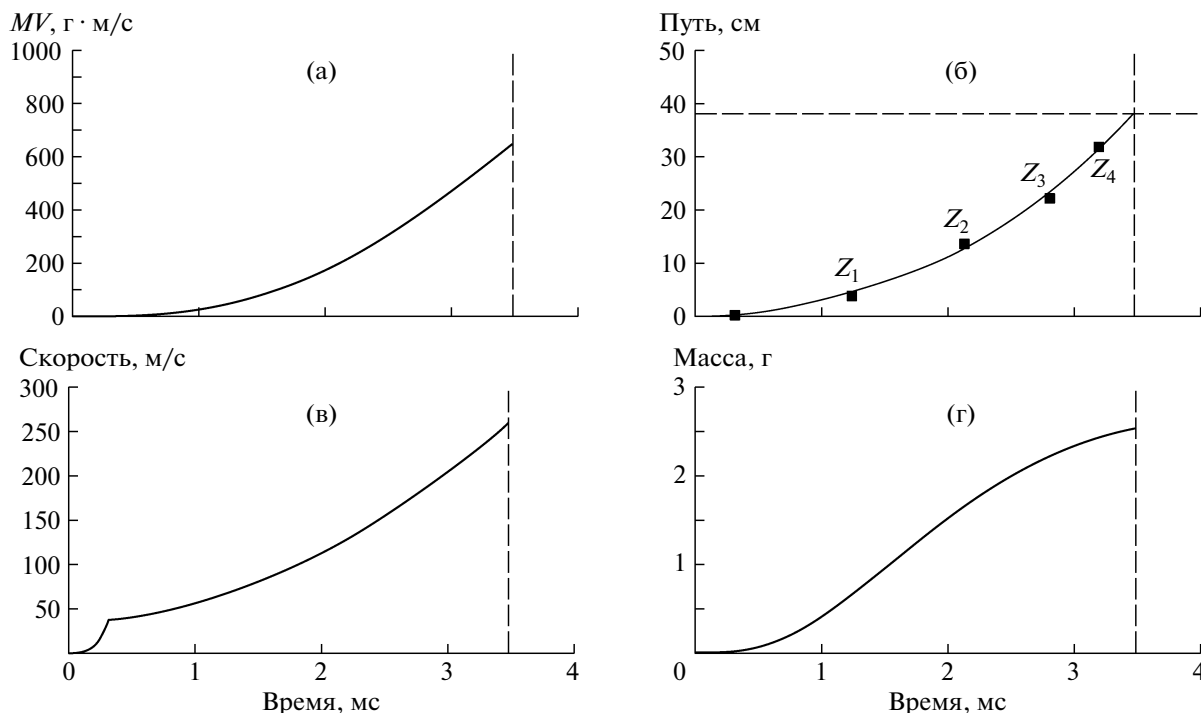
где  $M$ ,  $V$  и  $Z$  – масса, скорость и перемещение проводника;  $L'$  – градиент индуктивности рельсотрона;  $I$  – ток в цепи рельсотрона;  $t$  – время.

Особенность решения системы уравнений (1) и (2) состоит в том, что масса дуги не постоянна. Известна только масса медной проволоки (15.8 мг), после взрыва которой в парах меди возникает электрическая дуга. Эта стадия развития дуги определяется подводимой электрической мощностью и за-

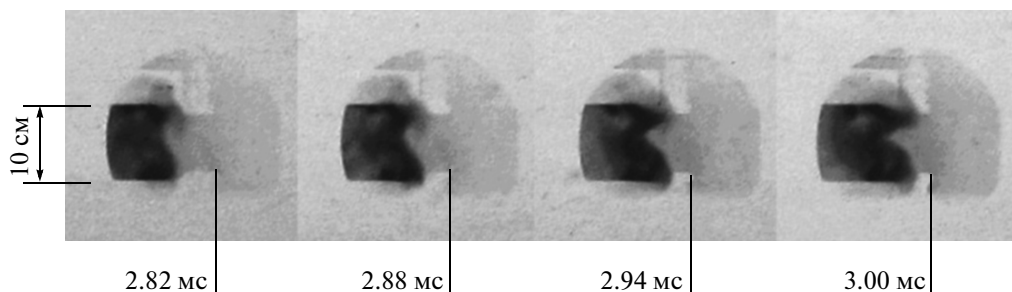
вершается, по нашим оценкам, примерно к 0.3 мс, а в последующем масса дуги увеличивается за счет ионизации воздуха. Так как известны величина  $L' = 9.54 \cdot 10^{-7}$  Гн/м [5] и изменение величины тока, то интегрирование уравнения (1) позволяет определить зависимость от времени произведения  $MV$  (рис. 6а). Ограничение представленной кривой по времени связано с приходом дуги на конец рельсотрона. Перемещение дуги в рельсотроне регистрировалось магнитными зондами (рис. 6б).

Начальный участок скорости (рис. 6в) получен расчетным путем с учетом формирования медной плазмы постоянной массы. На больших временах скорость дуги определяется по формуле (2) путем дифференцирования кривой, представленной на рис. 6б. Разделив величину количества движения дуги ( $MV$ ) на ее скорость, определяем изменение массы дуги вплоть до момента ее прихода на конец рельсотрона (рис. 6г).

На рис. 7 приведена СФР-грамма перемещения дуги, которая подтверждает экспериментальные



**Рис. 6.** Временные зависимости: а – количества движения дуги ( $MV$ ); б – перемещения дуги в рельсотроне ( $Z_1$ – $Z_4$  – координаты размещения магнитных зондов в эксперименте; точка на момент времени 0.3 мс указывает на координату в момент завершения формирования медной плазмы и рассчитывается из условия движения постоянной массы взрывающейся проволоочки); в – скорости дуги; г – массы дуги.



**Рис. 7.** СФР-грамма перемещения дуги при подходе к концу рельсов.

результаты и выводы, сделанные на основе выполненных расчетов, а также дает визуальную характеристику дуги при подходе к концу рельсов.

### ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ ДУГИ ОТКЛЮЧЕНИЯ

Взаимодействие дуги с диэлектрическими материалами осуществлялось в камере дугогашения ( $КД$ ), покрытой изнутри фторопластом, в которой размещалась решетка из листов диэлектрических материалов (рис. 8). В качестве диэлектрика выбрана фибра ФЭ (ГОСТ 14613-83). Динамика

восстановления электрической прочности ионизованного газа (низкотемпературной распадающейся плазмы), образовавшегося в камере дугогашения, определяла степень воздействия диэлектрического материала на процесс его охлаждения и фиксировала переходный процесс, во время которого газ из ионизованного состояния, характеризующегося наличием проводимости, переходит в состояние с полным ее отсутствием.

Этот процесс регистрировался активным электрическим зондом по току через разрядный промежуток ( $l_{\text{разр}} = 1$  см) между электродами зонда, подключенными через балластное сопротивление



Рис. 8. Общий вид размещения рельсотрона и решетки из диэлектрического материала в камере дугогашения.

ние к высоковольтному источнику питания [6]. Упрощенная электрическая схема для измерения в.э.п. показана на рис. 9. В процессе эксперимента измерялось падение напряжения  $U_6$  на балластном сопротивлении  $R_6$  от протекающего через разрядный промежуток тока зонда  $I_3$ . Очевидно,  $U_6 = U_C - U_{\text{разр}}$ . До тех пор, пока сопротивление разрядного промежутка  $r_{\text{разр}} = U_{\text{разр}}/I_3$  остается много меньше  $R_6$ , напряжение  $U_6 \approx U_C$ . При восстановлении электрической прочности разрядного промежут-

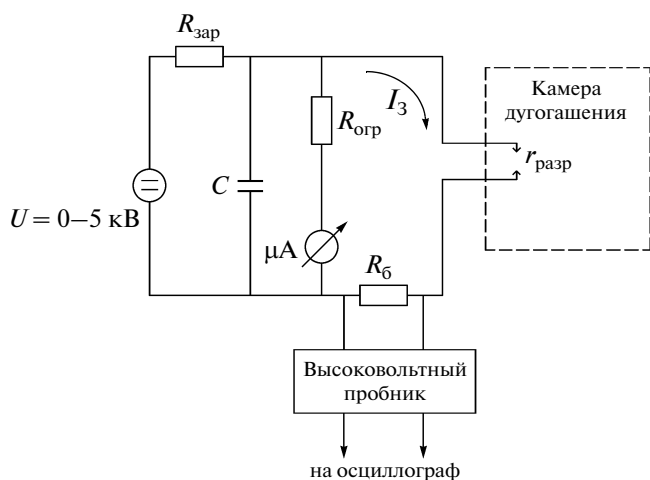
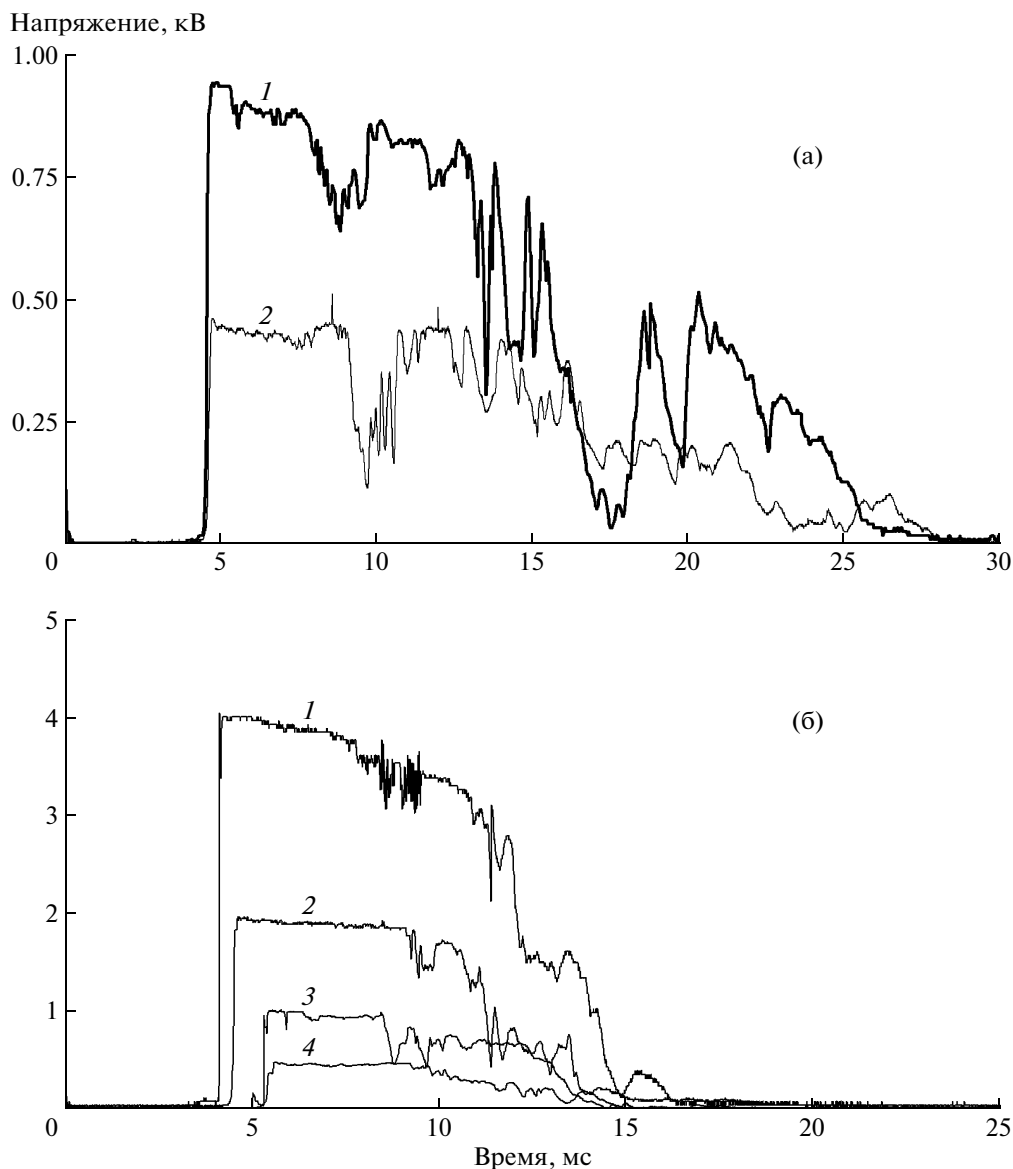


Рис. 9. Упрощенная электрическая схема для измерения времени в.э.п.  $C = 0.1 \text{ мкФ}$ ,  $R_6 = 1 \text{ МОм}$ .

ка, когда  $r_{\text{разр}} \gg R_6$ , а напряжение  $U_6$  спадает до нуля, фиксируется момент достижения распадающейся плазмой электрической прочности, установленной на уровне  $U_C$ . Максимальное значение тока устанавливалось исходя из условия минимального энерговклада в разрядный промежуток. В нашем случае при  $U_C = 5 \text{ кВ}$  максимальное значение тока  $I_3$  не превышало 5 мА. Электрический зонд устанавливался на равном удалении от верхнего и нижнего рельсов в конце рельсотрона.

На рис. 10 приведены осциллограммы напряжения, характеризующие процесс изменения электрической прочности воздушной плазмы при отсутствии ее взаимодействия с дугогасящими материалами и воздушной плазмы при ее взаимодействии с фиброй соответственно. В интервале времени 0–4 мс воздух в зоне установки активного датчика имеет большое сопротивление и  $U_6 = 0$ . При подходе сильноточной дуги к концу рельса (ко времени 4 мс) сопротивление  $r_{\text{разр}}$  резко падает, а напряжение  $U_6$  возрастает до максимального значения  $U_6 \approx U_C$ . Ко времени 8.3 мс ток дуги обращается в нуль и прекращается разогрев плазмы, что отмечено некоторым повышением электрической прочности (падением напряжения) плазмы.

Повышение напряжения (понижение электрической прочности) в диапазоне 10–16 мс можно объяснить торможением потока плазмы при контакте с торцом камеры и переходом кинетической



**Рис. 10.** Напряжение на разрядном промежутке активного электрического датчика при его взаимодействии с воздушной плазмой в зависимости от времени: **а** – 1 –  $U_C = 1$  кВ, 2 – 0.5 кВ; **б** – при контакте плазмы с фиброй, 1 –  $U_C = 4$  кВ, 2 – 2 кВ, 3 – 1 кВ и 4 – 0.5 кВ.

энергии потока во внутреннюю энергию, что приводит к увеличению температуры и давления плазмы в области сжатия. Восстановление электрической прочности наступает в районе 30 мс после диссипации энергии плазмы в результате нескольких циклов отражения и прохождения слабых волн внутри камеры дугогашения.

При взаимодействии дуги с фиброй процесс в.э.п. происходит аналогичным образом, однако время в.э.п. существенно уменьшается и завершается к 15 мс. Таким образом, диссипация энергии распадающейся плазмы от момента времени до-

стижений нуля тока (~8 мс) происходит для воздуха за время ~20 мс, а для фибры – за ~7 мс.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Созданная электрофизическая установка для моделирования коммутационных процессов с образованием высокоинтенсивной дуги отключения мощностью в десятки мегаватт и с транспортировкой ее в камеру дугогашения рельсотроном позволила регистрировать процесс взаимодействия плазмы с дугогасящими материалами и тем самым проводить отбор диэлектрических материалов по эффективности их воздействия на скорость охла-

ждения плазмы (скорость восстановления электрической прочности). Показано, что фибра по этому параметру превосходит воздух почти в три раза. Применение рельсотрона позволило определять динамические характеристики сильноточной дуги отключения, которые совместно с электрическими параметрами плазмы дают возможность оценить требования к системе “рельсотрон—камера дугогашения”, как конструктивного элемента для мощных размыкателей.

Полученные результаты могут быть использованы при разработке промышленного сильноточного (до 50 кА) выключателя переменного тока.

Работа подготовлена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации по результатам работ в рамках государственного контракта № 16.518.11.7012 от 12 мая 2011 г.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Физика и техника мощных импульсных систем / Под ред. Е.П. Велихова. М.: Энергоатомиздат, 1987.
2. Шёнбах К., Кристиансен М., Шеффер Г. // Труды Института инженеров по электротехнике и радиоэлектронике. 1984. Т. 72. № 8. С. 28.
3. Чунихин А.А. Электрические аппараты. М.: Энергоатомиздат, 1988.
4. Таев И.С. Электрические аппараты управления. М.: Высш. шк., 1984.
5. Кнопфель Г. Сверхсильные импульсные магнитные поля. М.: Мир, 1972.
6. Кравченко С.А., Кочуров И.В., Кузнецов Е.А. и др. // Теоретические и экспериментальные исследования, выполненные в 2002 году: Сборник трудов. Троицк: ОНТИ ГНЦ РФ ТРИНИТИ, 2003. Вып. 2. С. 20.