

04;12

## Динамика энерговыделения в импульсной дуге с низким напряжением горения в воздухе

© А.Н. Довбня,<sup>1</sup> К.В. Корытченко,<sup>2</sup> М.А. Красноголовец,<sup>1</sup> Ю.Я. Волколупов,<sup>1</sup>  
Ю.Д. Тур,<sup>1</sup> С.М. Шкирида,<sup>1</sup> А.И. Косой<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Научно-исследовательский комплекс „Ускоритель“,

61108 Харьков, Украина

e-mail: dovbnua@nik.kharkov.ua

<sup>2</sup> Харьковский институт танковых войск,

61034 Харьков, Украина

e-mail: entropia@rambler.ru

(Поступило в Редакцию 5 февраля 2003 г. В окончательной редакции 27 мая 2003 г.)

В работе рассмотрено влияние условий реализации разряда на динамику энерговыделения для импульсных дуг в воздухе в диапазоне начальных давлений  $10^5 - 8 \cdot 10^5$  Па и напряжении заряда низковольтной емкости  $C_1$  до 400 В. Предложена методика экспериментальной оценки сопротивления разрядного канала на конечной стадии развития искрового разряда. Приведены результаты этой оценки.

### Введение

В стационарной дуге высокого давления достигается термодинамическое равновесие в газовой среде, чем обеспечиваются оптимальные условия разогрева среды электрическим током. Очевидно, что исследование процесса перехода искрового разряда в дуговой позволяет решить задачу быстрого и эффективного разогрева газовой среды. При малой длительности переходного процесса создается возможность реализации плазменно-волновой системы формирования интенсивных ударных волн с последующим созданием новых технических устройств, например газодинамического пульсирующего лазера детонационного горения и прямоточно-пульсирующего воздушного реактивного двигателя [1].

### Задачи, решаемые при исследовании импульсной дуги в газе

Переход искрового разряда в дугу сопровождается изменением типов столкновений, приводящих к ионизации газа в разрядном канале. Если в первый период преобладает ионизация нейтральных молекул электронным ударом, то в дальнейшем она сменяется ступенчатой ионизацией с последующим переходом к ионизации, возникающей в результате столкновений возбужденных атомов с нейтральными молекулами. Последнее имеет место при достижении высокой температуры газа. При этом под ступенчатой ионизацией понимается ионизация молекул путем их прохождения через возбужденные состояния. Эти процессы ионизации сопровождаются изменением напряженности электрического поля в разрядном канале.

Таким образом, установив на электродах напряжение, незначительно отличающееся от величины падения потенциала в положительном столбе равновесной дуги, возможно развить дуговой режим разряда.

Следует отметить, что в искровом разряде достигается высокая степень ионизации канала. Тем не менее для дальнейшего протекания тока разряда необходимым условием является удержание порогового напряжения на электродах. Величина этого напряжения определяется, в том числе исходя из температуры газа в разрядном канале. Полагается, что при низком напряжении на электродах возникающей при этом величины напряженности поля недостаточно для осуществления ионизации молекул газа в канале электронным ударом. При незначительном энерговыделении в искровом разряде и соответственно достигаемой при этом низкой кинетической температуре газа в канале указанная величина порогового напряжения оказывается больше величины падения потенциала на электродах, соответствующих стационарному дуговому разряду. Если после искрового пробоя при удержании на электродах напряжения, незначительно отличающегося от величины падения потенциала в положительном столбе равновесной дуги, удастся развить разрядный ток, то можно судить о достижении высокой кинетической температуры газа в разрядном канале на конечной стадии развития искры. Определив сопротивление искрового канала на конечной стадии его развития на фиксированном разрядном промежутке, путем сравнительного анализа возможно оценить соответствие параметров газа в разрядном канале на этот момент параметрам газа в стационарной дуге.

Отсюда возникла задача определить сопротивление разрядного канала на конечной стадии развития искрового разряда путем оценки величины порогового напряжения, при котором происходит развитие тока в данной электрической схеме при фиксированной величине энерговыделения в искровом разряде. Применительно к плазменно-волновой системе требовалось оценить этот параметр при величине энергии, вкладываемой в искровой разряд, не превосходящей 1 Дж на 1 см межэлектродного расстояния. Кроме этого, требовалось установить зависимость периода и динамики

энерговыведения при импульсной дуге от напряжения заряда низковольтной емкости, величины межэлектродного расстояния, начального давления газовой среды в разрядном промежутке. Установление этих параметров позволяет оценить область применения импульсных дуг в технических устройствах с точки зрения требуемой скорости энерговыведения.

## Экспериментальная часть

1. Характеристики опытной установки и область исследований. Электрическая схема опытной установки приведена на рис. 1. Она обеспечивала возможность регулирования амплитуды высоковольтного импульса напряжения на вторичной обмотке трансформатора  $T$  до 26 кВ. Напряжение заряда низковольтной емкости  $C_1$  регулировалось в диапазоне 0–400 В. Коэффициент трансформации импульсного трансформатора  $T$  составил 1:2. Сердечник трансформатора был выполнен из электротехнической стали марки ЭТ 3424 сечением  $7.5 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$  и средней длиной магнитной линии 0.44 м. В качестве высоковольтной емкости  $C_2$  применялись конденсаторы марки КВИ-3 суммарной емкостью  $6 \times 680 \text{ пФ}$ . Максимально возможная величина энергии, вкладываемой в искровой разряд, не превышала 0.7 Дж. Так как емкость  $C_2$  была включена в схему с полным разрядом накопителя, то, учитывая что коэффициент полезного действия данного трансформатора составляет около 90%, можно было с небольшой погрешностью установить энергию, вкладываемую в искровой разряд. Данные исследования были проведены для разряда в воздухе при начальной температуре 293 К и давлении газа в диапазоне  $10^5$ – $8 \cdot 10^5 \text{ Па}$ . Расстояния между электродами в разрядном промежутке составляли 0.9, 1.9, 3 мм. Electroды разрядника были изготовлены из стали марки Х18Н10Т. На указанных расстояниях, чтобы учесть влияние неоднородности электрического поля, были измерены напряжения статического пробоя при атмосферных условиях, которые составили 3, 5 и 9 кВ соответственно. Короткая длительность высоковольтного импульса напряжения не позволила осуществить разряды на большем расстоянии [2].

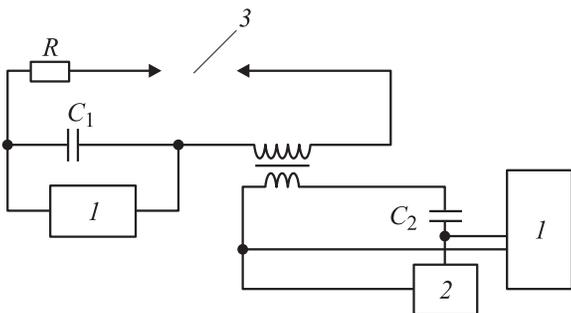


Рис. 1. Схема импульса-дугового разряда: 1 — зарядное устройство, 2 — коммутатор,  $R$  — измерительный шунт, 3 — разрядный промежуток.

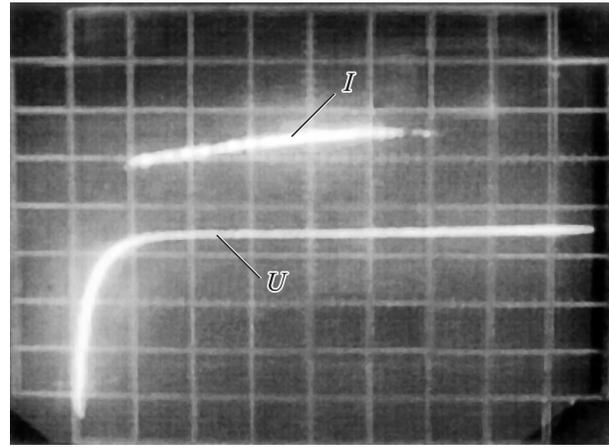
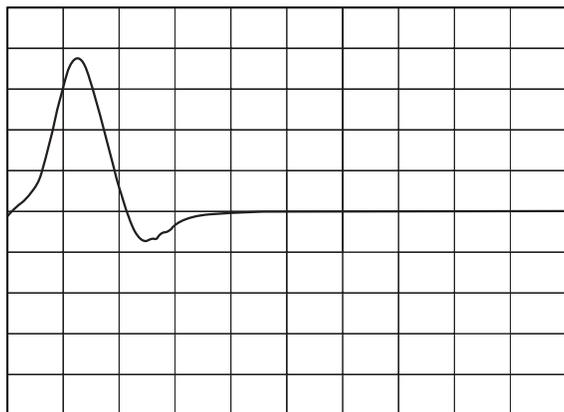


Рис. 2. Осциллограммы тока и напряжения. Развертки: скорость —  $50 \mu\text{s}/\text{square}$ ,  $I = 5.4 \text{ A}/\text{square}$ ,  $U = 500 \text{ V}/\text{square}$ .

2. Оценка сопротивления разрядного канала на конечной стадии развития искры. Сопротивление разрядного канала удалось оценить следующим образом. Искровой разряд производился на фиксированном разрядном промежутке. Изменяя напряжение заряда низковольтной емкости  $C_1$ , производились измерения динамики развития тока в цепи разряда. Это позволило для фиксированного разрядного промежутка определить минимальное напряжение  $U_{\text{min}}$ , при котором происходит дальнейшее протекание тока разряда. Зная, что величина прогового тока пятна на катоде определяет минимальный ток  $I_{\text{min}}$ , при котором протекает разряд, возможно определить сопротивление  $R$  канала на конечной стадии развития искрового разряда по формуле  $R = U_{\text{min}}/I_{\text{min}}$ . Согласно данным [3], пороговый ток пятна для катода из железа составляет  $I_{\text{min}} = 1.5 \text{ А}$ .

В результате исследования организации импульсной дуги на разрядном промежутке 0.9 мм было определено минимальное напряжение, при котором происходит протекание тока разряда. Как видно из рис. 2, протекание тока происходит при напряжении на разрядном промежутке равном 35 В, а амплитудное значение тока для данной разрядной емкости составляет около 3 А. При заряде емкости  $C_1$  до 30 В протекания тока в цепи разряда не наблюдалось. Для исключения предположения, что параметры цепи ограничивают ток разряда до минимальной величины тока зажигания дуги и тем самым срывают разряд, данная электрическая цепь была исследована на разряд через контакты реле. Амплитудное значение тока в этом случае составило до 100 А (рис. 3). Измерение указанной величины минимального напряжения на разрядном промежутке расстоянием 1.9 мм дало значение около 45 В при амплитудном значении тока в разряде до 6 А. В разряде через реле при этом напряжении величина амплитуды тока в цепи составила более 160 А. В обоих случаях величина энергии, вкладываемой в искровой пробой, была чуть более 0.1 Дж. При данном энерговкладе в



**Рис. 3.** Оциллограмма тока при разряде через контакты реле. Напряжение заряда  $U_1 = 35$  V. Развертка: скорость —  $0.2$  ms/square,  $I = 27$  A/square.

искровой пробой сопротивление искрового канала на конечной стадии его развития составило: для разрядного промежутка расстоянием  $0.9$  mm  $R = 23$   $\Omega$ , для  $1.9$  mm  $R = 30$   $\Omega$ . Сравнение этих значений с сопротивлением положительных столбов стационарных дуг показывает, что при тех же условиях разряда сопротивление последних на порядок меньше [3]. Отсюда делается вывод, что дальнейшее развитие разряда при низком напряжении на разрядном промежутке возможно в данном случае путем ступенчатой ионизации газа.

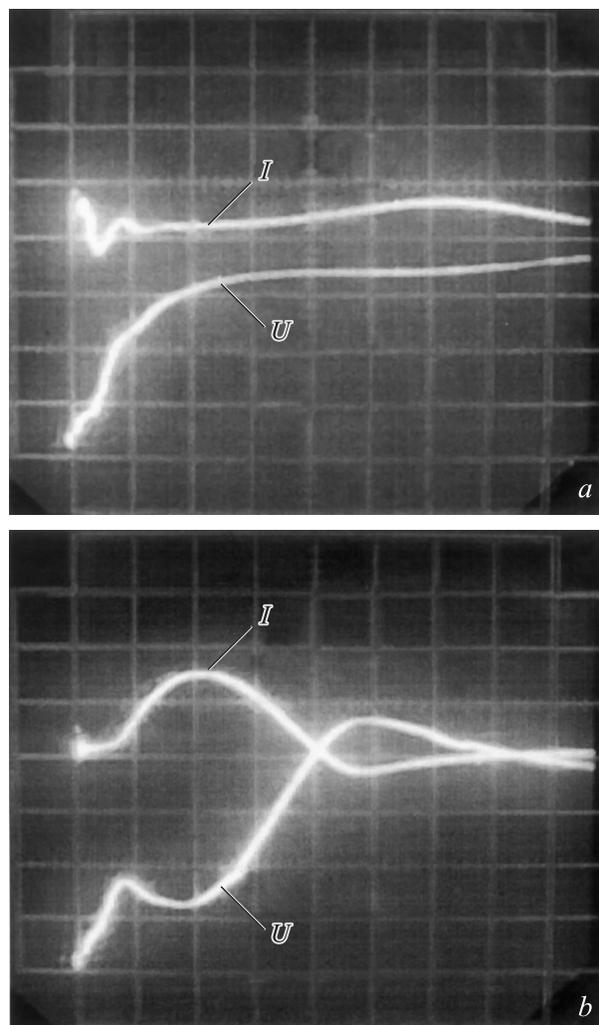
Следует отметить, что при минимальных напряжениях, обеспечивающих дальнейшее протекание тока разряда, происходит частичный разряд низковольтной емкости  $C_1$ . Следовательно, данное напряжение на электродах не обеспечивает поддержание степени ионизации в разрядном канале, полученной в результате искрового разряда, что и приводит к возрастанию сопротивления в разрядном канале и соответственно к прекращению разряда.

Таким образом, установить величину порогового напряжения, при котором происходит зажигание импульсной дуги, возможно путем установления напряжения заряда емкости  $C_1$ , приводящего к ее полному разряду. В результате исследования было установлено, что пороговое напряжение при величине энерговыделения в искровой разряд не более  $1$  J на  $10^{-2}$  m межэлектродного расстояния составляет не менее  $60$  V/mm. Следует отметить, что включенные в цепь разряда индуктивности в виде вторичной обмотки трансформатора и собственная индуктивность емкости влияют на значение порогового напряжения. Это вызвано задержкой нарастания тока, что влияет на баланс процессов ионизации и деионизации. Поэтому данная цифра дает приблизительную оценку этой величины.

3. Влияние напряжения заряда низковольтной емкости и величины межэлектродного расстояния на динамику энерговыделения в импульсной дуге. Изучение графиков развития тока и напряжения в разрядной цепи

позволило сравнить длительность и динамику энерговыделения, получаемые на экспериментальной установке в разных условиях разряда. Характерной особенностью, выявленной при сравнении этих графиков, оказалось уменьшение длительности разряда с возрастанием напряжения заряда низковольтной емкости на фиксированном разрядном промежутке. Например, при величине напряжения заряда емкости  $C_1$  равной  $100$  V длительность периода горения импульсной дуги составила около  $0.14$  ms, а при величине напряжения в  $400$  V период горения импульсной дуги составил около  $0.06$  ms (рис. 4, *a, b*).

Следует отметить, что при изучении динамики энерговыделения в данной схеме разряда довольно трудно точно определить влияние каждой составляющей условий реализации разряда. Это вызвано тем, что нагрузка и часть элементов разрядной цепи имеют нелинейные параметры. Поэтому потребовалось дополнитель-



**Рис. 4.** *a* — осциллограммы тока и напряжения. Развертки: скорость —  $20$  ms/square,  $I = 270$  A/square,  $U = 1000$  V/square. *b* — осциллограммы тока и напряжения. Развертки: скорость —  $20$  ms/square,  $I = 1351$  A/square,  $U = 200$  V/square.

ное исследование собственных параметров цепи, что было сделано путем замены разрядного промежутка на значительно более низкоомную нагрузку. В результате выяснилось, что пологая кривая нарастания тока и зависимость длительности разряда от величины заряда емкости  $C_1$  определяются в том числе и собственными параметрами цепи. Поэтому установление влияния других условий разряда проводилось при фиксированных значениях отдельных параметров.

При фиксированных параметрах напряжения заряда емкостей и увеличении межэлектродного расстояния происходило незначительное возрастание длительности разряда с уменьшением амплитуды тока разряда. Так, при напряжении заряда емкости  $C_1$  равной 200 В длительность импульсной дуги на промежутке 0.9 мм составляла 0.075 мс, а на промежутке 3 мм — 0.08 мс. Падение амплитуды тока в этом случае составило около 30 А при величинах амплитуд тока более 1000 А.

4. Влияние начального давления газовой среды в разрядном промежутке на длительность и динамику энерговыделения в схеме разряда. Данное исследование было проведено для разряда в воздухе на „открытых“ промежутках расстоянием 0.9 и 1.9 мм, давлении газа в диапазоне  $10^5$ – $8 \cdot 10^5$  Па и его начальной температуре, равной 293 К. Термин „открытый“ здесь применяется потому, что объем разрядной полости на несколько порядков превосходит объем разрядного канала. Для уменьшения погрешностей в процессе измерений проводилось только изменение давления воздуха в разрядной полости при фиксированных напряжениях заряда емкостей.

В результате исследований было выявлено, что с ростом начального давления газа в разрядной полости в данных условиях происходит падение амплитуды разряда с возрастанием его длительности. Такой процесс более выражен при возрастании величины напряжения  $U_1$  заряда емкости  $C_1$ . Например, при  $U_1 = 200$  В и начальном давлении  $5.8 \cdot 10^5$  Па падение амплитуды тока составило не менее 30 А, а при  $U_1 = 60$  В и той же величине давления, падение амплитуды тока составило около 12 А. При этом возрастание длительности разряда в первом случае составило около 5 мс, во втором — около 20 мс. Такое влияние начального давления объясняется зависимостью от этого параметра сопротивления разрядного канала с учетом прикладываемого напряжения к разрядному промежутку.

## Выводы

Предлагаемый в работе метод оценки сопротивления канала на конечной стадии развития искрового разряда позволяет оценить параметры газа в разрядном канале. Данная работа позволила установить зависимость периода и динамики энерговыделения в схеме импульсной дуги от напряжения заряда низковольтной емкости,

величины межэлектродного расстояния, начального давления газовой среды в разрядном промежутке. Оценка динамики энерговыделения показала возможность применения данной схемы организации импульсной дуги в плазменно-волновой системе формирования интенсивных ударных волн.

## Список литературы

- [1] Корытченко К.В., Волколупов Ю.Я. и др. // ЖТФ. 2002. Т. 72. Вып. 4. С. 124–125.
- [2] Дж. Мик, Дж. Крег. Электрический пробой в газах. М.: ИЛ, 1960. 495 с.
- [3] Райзер Ю.Л. Физика газового разряда. М.: Наука, 1987. 591 с.