

решения, построенные в этих двух областях, сшивались при  $r = r_0$ . При расчетах использовались методы, изложенные в работе [4].

В заключение отметим следующее:

- 1) вязкость оказывает стабилизирующее влияние (особенно в области очень малых и очень больших волновых чисел);
- 2) критерием устойчивости является произведение  $PS$ , критическое волновое число с уменьшением радиуса дуги от 1 до 0,01 меняется незначительно (от 2,6 до 4,1), при этом фазовая скорость равна нулю;
- 3) модель идеальной жидкости при исследовании задач об устойчивости электрической дуги применима почти всегда, за исключением областей очень малых и очень больших волновых чисел.

Поступила 25 VIII 1977

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Финкельбург В., Меккер Г. Электрическая дуга и термическая плазма. М., ИЛ, 1961.
2. Бобнев А. А. Устойчивость электрической дуги к симметричным возмущениям при малых значениях волнового числа. — «Изв. СО АН СССР. Сер. техн.», 1974, № 13, вып. 3.
3. Бобнев А. А. Гидродинамическая устойчивость электрической дуги при симметричных возмущениях. — «Изв. СО АН СССР. Сер. техн.», 1974, № 13, вып. 3.
4. Сапожников В. А. Численное решение задач гидродинамической устойчивости. — В кн.: Труды секции по численным методам в газовой динамике II международного коллоквиума по газодинамике взрыва и реагирующих систем. Т. III. М., изд. ВЦ АН СССР, 1971.

УДК 621.316.932

### О ГАШЕНИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ДУГИ С ПОМОЩЬЮ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ

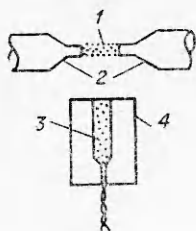
П. И. Зубков, Л. А. Лукьянчиков, К. А. Тен

(Новосибирск)

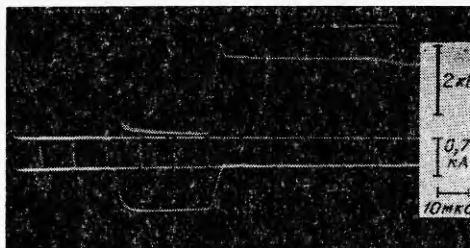
Применение взрывчатых веществ (ВВ) для размыкания силовых цепей позволяет значительно уменьшить время выключения. В [1, 2] описаны конструкции взрывных выключателей, имеющих время срабатывания  $\sim 10$  мкс при токах  $\sim 100$  кА. Отмечается, что большую часть общего времени выключения занимает время угасания электрической дуги, возникающей при разрушении токоведущей шины. В связи с этим изучение процесса гашения дуг с помощью продуктов взрыва становится необходимым для создания более эффективных взрывных выключателей. Взаимодействие ударных волн с плазмой электрической дуги имеет также самостоятельный интерес.

В данной работе приводятся экспериментальные данные, полученные при гашении электрических дуг при токах 0,5—3,0 кА с помощью ВВ. Показано, что гашение электрической дуги осуществляется ударными волнами, причем на начальном этапе рост сопротивления определяется сжатием дуги во фронте волны. Результаты исследований могут быть применены при создании взрывных выключателей, работающих без разрушения токоведущих шин.

В выключателях с использованием ВВ на процесс гашения электрической дуги оказывают влияние такие факторы, как разрушение и разлет токоведущих шин, возникновение и развитие дугового разряда, взаимо-



Фиг. 1



Фиг. 2

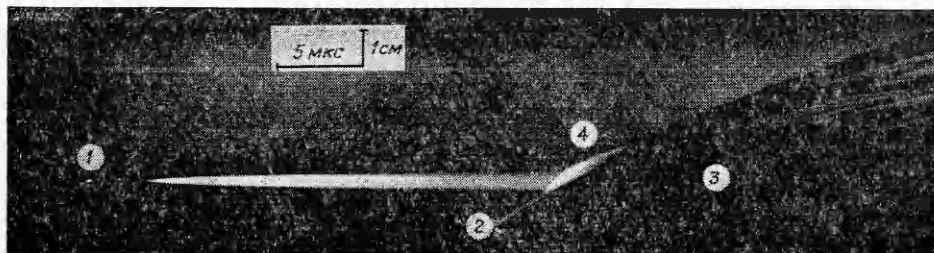
действие дуги с ударными волнами (УВ) и продуктами детонации (ПД).

В работе проводилось гашение развитой дуги, горячей между неподвижными электродами (фиг. 1), что позволило исследовать влияние на процесс УВ и ПД при незначительном воздействии других факторов.

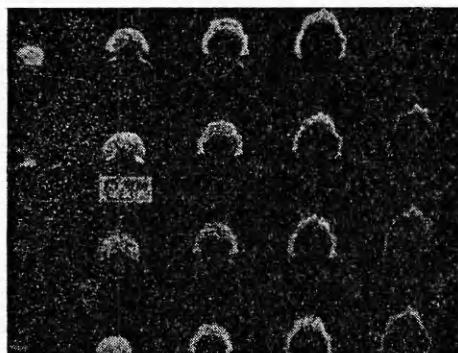
Электрическая дуга  $I$  поджигалась между электродами  $2$ , включенными в разрядный контур ( $C = 280$  мкФ,  $L = 3$  мкГ,  $R = 0,7-2,9$  Ом). Значение тока в цепи варьировалось изменением начального напряжения на емкости и сопротивлением  $R$ .

Гашение производилось с помощью ВВ  $3$ , расположенного в стальной гильзе  $4$  на расстоянии  $20$  мм от оси электродов, диаметр (толщина) которых равнялся  $6$  мм, при неизменном расстоянии между ними в  $14$  мм. Ток в цепи и напряжение на промежутке записывались с помощью компенсационных датчиков [3] на осциллографе ОК-25. Одновременно процесс регистрировался тепловской съемкой на СФР. Время гашения отсчитывалось от начала спада тока до достижения им осциллографического нуля. В качестве ВВ использовался порошковый ТЭН. Масса заряда не превосходила  $1$  г.

*Цилиндрические электроды.* На фиг. 2,3 приведены характерные осциллограмма (верхний луч — напряжение на промежутке, нижний — ток в цепи) и фоторазвертка процесса, на которой можно проследить образование дуги  $1$ , положения УВ  $2,4$  и ПД  $3$ . Волна (см. фиг. 3), возникающая при детонации заряда ВВ, распространяется по невозмущенному воздуху со скоростью  $5,6$  км/с в направлении осп разряда. Вблизи границы дуги она ускоряется до  $10$  км/с, двигается по ней с практически постоянной скоростью и на границе с воздухом замедляется вновь. Светящаяся область, отождествляемая с токопроводящим каналом, следует за фронтом УВ и, как показывают покадровые снимки (фиг. 4), принимает форму последнего. При этом длина дуги увеличивается, ее пятна свободно перемещаются по боковой поверхности электродов. Экспериментальные данные приведены в таблице, где  $\tau_1$  — время гашения,  $D_1$  — скорость УВ



Фиг. 3



Фиг. 4

в воздухе. Применение изоляции затрудняет перемещение пятен и приводит к уменьшению времени процесса приблизительно на 25%.

Описанная картина имеет место при токах, меньших некоторого критического, зависящего от сопротивления цепи. При больших токах характер процесса меняется. В момент времени, близкий к выходу УВ на границу дуги с воздухом, вблизи токопроводящего канала возникает пробой, развивающийся в новый токопроводящий канал, движущийся в дальнейшем значительно медленнее фронта волны и приводящий

к быстрому угасанию первого. Время гашения в этом случае увеличивается приблизительно на порядок и оказывается зависящим от скорости УВ. С увеличением последней оно уменьшается.

В области электродов фронт волны и продукты взрыва следуют друг за другом на расстоянии 5 мм, поэтому разделить их влияние на процесс не представляется возможным. Необходимая информация была получена в серии экспериментов, в которых заряд располагался на расстоянии 45 см от оси дуги. Для уменьшения затухания из-за боковой разгрузки поток к разрядному промежутку направлялся внутри неразрушаемой стальной трубки. К началу взаимодействия с дугой фронт разрыва опережал продукты на  $10^{-5}$  с.

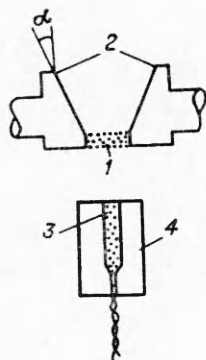
Было установлено, что при равных скоростях УВ время спада тока практически не изменилось. Взаимодействие волны приводило к кратковременному гашению дуги, вслед за которым возникали пробои промежутка перед потоком продуктов.

*«Косые» электроды.* На «косых» электродах (фиг. 5) исследовалось гашение дуг с токами, меньшими критических. Эксперименты показывают, что характер процесса зависит от угла раствора  $\alpha$  электродов. Так, при  $\alpha > 40^\circ$  он практически таков же, что и в опытах с цилиндрическими электродами. При  $\alpha \leq 40^\circ$  токопроводящий канал движется вместе с фронтом УВ, оставаясь параллельным первоначальному положению. Времена гашения  $\tau_2$  на «косых» электродах приведены в таблице. Характерно, что  $\tau_2 > \tau_1$ . Здесь же приведена длина дуги  $l$  перед угасанием. Она значительно увеличивается при увеличении отключаемого тока и медленно растет с увеличением скорости УВ.

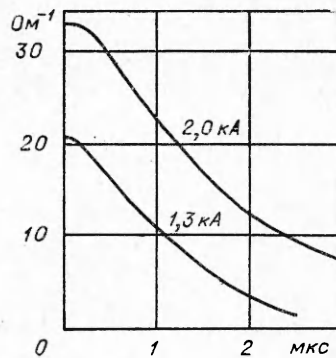
Необходимо отметить, что угасание происходит и без увеличения длины ( $\alpha = 0$ ), причем время процесса в исследуемом интервале возрастает вместе со скоростью УВ. Например, для тока 500 А при  $D_1 = 4,2; 5,2; 6,1$  км/с  $\tau_2 = 2,9; 3,4; 3,1$  мкс соответственно.

*Прямоугольный канал.* Уменьшить влияние значительных боковых разгру-

$I, A$	$D_1, \text{км/с}$	$\tau_1, \text{мкс}$	$\tau_2, \text{мкс}$	$l, \text{мм}$
1300	6,0	5,3	6,1	38
	5,2	6,1	6,8	36
	4,1	7,7	9,0	40
1000	6,1	4,1	4,8	32
	5,3	5,1	5,0	30
	4,4	4,8	5,3	29
700	6,2	3,2	3,8	29
	5,1	3,5	4,0	27
	4,2	3,7	4,2	26
500	6,1	2,7	3,5	25
	5,3	2,9	3,3	24
	4,3	3,0	3,2	22



Фиг. 5



Фиг. 6

зок в УВ удается при гашении дуги в прямоугольном канале ( $1,5 \times 1,5 \times 12$  см), образованном плоскими электродами (медь) и изоляторами (оргстекло). При токах, меньших критических, характер процесса практически такой же, как в экспериментах с «косыми» электродами ( $\alpha = 0$ ), при больших — вблизи токопроводящего канала происходит пробой и повторное разгорание дуги, движущейся впоследствии с массовой скоростью за фронтом. Сопротивление промежутка при этом  $0,7-1,0$  Ом, что на порядок больше начального. Полное угасание дуги происходит после выноса ее из канала.

На тепловом снимке (см. фиг. 3) после взрыва проводника хорошо видно образование и развитие токопроводящего канала дуги и движение возникших при этом цилиндрических УВ. К моменту начала гашения развитие канала заканчивается, его размеры меняются незначительно. Судя по осциллограмме (см. фиг. 2), в дуге течет практически постоянный ток. Расходящиеся цилиндрические волны двигаются к этому времени со скоростью, близкой к звуковой, поэтому отсутствие заметного движения газа позволяет считать давление в области, охваченной волнами, близким к атмосферному. Температура в канале ( $9-10$ )  $10^3$  К оценена по средней электропроводности в предположении, что по светящейся части дуги течет основной ток; согласно [4,5], в этой области протекает 90% тока. При указанных параметрах длина свободного пробега электронов определяется рассеянием их на ионах, т. е. плазму дуги можно считать сильно-ионизованной, а электропроводность  $\sim T^{3/2}$  при пренебрежении логарифмической зависимостью от плотности.

В экспериментах скорости УВ, образующихся при взрыве зарядов ВВ, изменялись от 4,1 до 6,2 км/с, это соответствует давлениям, температурам и массовым скоростям, изменяющимся в пределах 100—440 атм, 5400—8900 К, 3,7—5,7 км/с соответственно [6]. Регистрация УВ осуществлялась по самосвечению, возникающему во фронте и затухающему в волне разгрузки, образующейся из-за неоднородности движения.

В области изменения плотности газа от практически нормальной  $\rho$  до плотности в дуге  $\rho_1$  происходит градиентное ускорение УВ, носящее скачкообразный характер. Эту область будем рассматривать как контактную поверхность. При распаде разрыва на этой поверхности образуется УВ, двигающаяся по ионизованному газу, и волна разрежения, распространяющаяся вверх по потоку. Практически постоянная скорость фронта в плазме дуги говорит о слабой зависимости параметров газа от координаты.

На фронте волны, если отвлечься от его структуры, вместе с температурой терпит разрыв электропроводность. Причем, как показывают оценки и численный счет, проведенный для плоского случая с уравнением состояния  $E = 8,3(T/10^4)^{1,5}(\rho/\rho_1)^{0,12}$  эВ/моль, взятым из [7] в предположении, что тепловое равновесие устанавливается мгновенно, температура из-за дополнительной ионизации газа растет приблизительно в 1,5 раза для наблюдаемых в экспериментах скоростей, что приводит к увеличению электропроводности всего лишь вдвое. Такое увеличение электропроводности не может компенсировать уменьшение сечения токопроводящего канала из-за сжатия, которое в зависимости от начального тока в цепи и скорости меняется от 4 до 10. Этим объясняется тот факт, что сопротивление дуги начинает расти практически одновременно с преломлением волны на контактной поверхности.

В плоском случае такая картина процесса должна давать линейное (так как скорость фронта постоянна) по времени уменьшение проводимости. На фиг. 6 приведены зависимости ее от времени для токов 1,3 и 2,0 кА в плоском канале. На большей части графика спад можно считать линейным, значительные отличия в начале и в конце графика, вероятно, связаны с неоднородностью процесса. Вычисленные по фиг. 6 электропроводности с использованием измеренных в экспериментах параметров дают увеличение ее в 2—2,5 раза, что согласуется с оценками по температуре.

При переходе второй контактной границы образуется преломленная волна, наблюдаемая в экспериментах, и, как показывают оценки и численный счет, отраженная волна, приводящая к дальнейшему сжатию дуги и увеличению ее сопротивления. Преломленная волна движется со скоростью, несколько меньшей начальной.

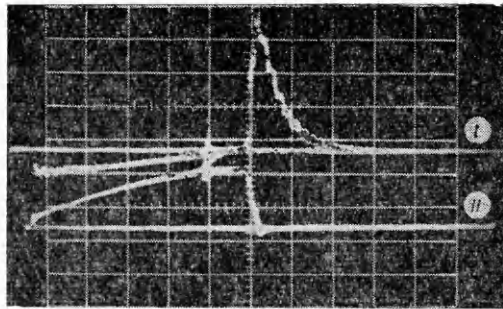
В дальнейшем газодинамическая картина должна быть следующей. Контактная граница, отделяющая сжатый в преломленной волне воздух от токопроводящего канала, будет перемещаться с массовой скоростью за фронтом. Разность температур на контактной поверхности  $\sim 10^4$  К, что должно приводить к ее размытию. Отраженная же волна, отражаясь попеременно от границ, будет продолжать сжимать дугу.

Надо заметить, что в экспериментах такая картина не наблюдается. Токопроводящий канал начинает следовать непосредственно за фронтом преломленной УВ. Во всяком случае отделить его свечение от свечения во фронте не удастся. Более того, значительное излучение канала наблюдается в тех местах, где ударный переход в экспериментах без гашения практически не светится. Проводящая зона оказывается при этом ограниченной с одной стороны фронтом волны, с другой, по-видимому, газом, охлажденным в волне разрежения, возникающей из-за неоднородности движения. Такое поведение дуги при взаимодействии с УВ приводит к непрерывному обмену газа в токопроводящем канале. Причем вместе с потоком газа через проводящую зону существует и поток энергии. Превышение потока отвода энергии над мощностью выделения ее из цепи вызывает угасание канала.

Рассмотренная газодинамическая картина, близкая к одномерной, качественно согласуется с результатами экспериментов. В частности, увеличение интенсивности волны уменьшает поток энергии при неизменной длине дуги и увеличивает время гашения. Увеличение же длины канала в случае цилиндрических и «косых» электродов увеличивает поток, что приводит к ускорению процесса.

Угасание токопроводящего канала сопровождается рекомбинацией заряженных частиц, в связи с чем возникает необходимость рассмотрения роли неравновесного рекомбинационного излучения.

Согласно [7], длина свободного пробега квантов при связанно-свободных переходах для наших плотностей такого же порядка, что и размер сжатого УВ канала, поэтому будем считать излучение незапертым. При оценке мощности излучения предположим, что вначале УВ переводит плазму дуги в новое термодинамическое состояние, соответствующее равновесию за фронтом, а затем происходит рекомбинация всех электронов на основные уровни в атомах. Для указанных выше параметров газа при скорости волны 10 км/с мощность излучения дуги в азоте  $10^6$  Вт. Водородоподобные атомы, находящиеся в аналогичных условиях, излучают  $10^6$ — $10^7$  Вт [7]. Мощность излучения воздуха в термодинамическом равновесном состоянии при плотности  $10^{-3}$  г/см<sup>3</sup> и температуре  $25 \cdot 10^3$  К составляет  $1,2 \cdot 10^6$  Вт [8].



Фиг. 7

Приведенные оценки показывают, что при рассмотрении баланса энергии в дуге, сжатой УВ, пренебрегать излучением нельзя, так как мощность его оказывается порядка выделяющейся в канале. Кроме того, при некоторых обстоятельствах излучение может играть решающую роль. Например, если в плоском канале над дугой поставить жесткую стенку, то поток газа и вместе с ним кондуктивный перенос энергии через токопроводящий канал будут отсутствовать. Несмотря на это, гашение в такой постановке наблюдается при токах  $> 3$  кА (критический ток без стенки 1,8 кА). В этом случае ответственным за гашение является, видимо, излучение. Излучением же можно объяснить и тот факт, что токопроводящий канал двигается непосредственно за фронтом волны. Лучистая теплопроводность при этом должна обеспечить относительно газа скорость границы прогрева 500 м/с, так как при  $\bar{D}_1 = 5,6$  км/с в воздухе массовая скорость  $u = 5,07$  км/с [6]. Для обеспечения скорости 500 м/с необходима мощность  $10^6$ — $10^7$  Вт.

Как уже указывалось выше, при токах, больших критических, процесс носит иной характер. После преломления УВ на второй контактной поверхности вблизи сжатой дуги возникает пробой, развивающийся в новый токопроводящий канал,двигающийся с массовой скоростью. Пробой обусловлен тем, что при распаде разрыва на первой контактной границе вверх по потоку распространяется волна разрежения. Если считать, что к дуге примыкает область постоянного решения с параметрами газа, прошедшего волну разрежения, то получим для плотности значение, близкое к нормальной, а температура будет порядка  $4 \cdot 10^3$  К. По данным же [8] при такой плотности электрическая прочность воздуха сильно падает, начиная с  $2 \cdot 10^3$  К. Характерно, что в наших экспериментах пробой происходил при напряжении 1,3 кВ практически независимо от начального тока в цепи.

Как следует из вышеизложенного, обжатие электрической дуги сильными УВ можно эффективно использовать при переключении токов. На фиг. 7 приведена оциллограмма процесса переключения тока 18 кА (II луч, развертка 25 мкс/дел.) из индуктивного накопителя с  $I_1 = 13,6$  мкГ в нагрузку  $R_1 = 1,09$  Ом (I луч, 3,9 кА/дел.). Максимальное напряжение на промежутке длиной 14 мм в момент угасания электрической дуги 20 кВ.



Авторы выражают благодарность А. П. Ершову за ценные обсуждения и А. И. Николину за помощь в проведении ряда экспериментов.

Поступила 28 VII 1977

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Зубков П. И., Лукьянчиков Л. А. Размыкание силовых цепей с помощью ВВ.— ФГВ, 1973, № 3.
2. Войтенко А. Е., Жеребненко В. И., Захаренко И. Д., Исаков В. П., Фалеев В. А. Размыкание электрического тока взрывом.— ФГВ, 1975, № 1.
3. Киселев Г. И., Лукьянчиков Л. А. Компенсационный способ измерения тока и напряжения.— «Приборы и техника эксперимента», 1974, № 4.
4. Залесский А. М. Электрическая дуга отключения. М., Госэнергоиздат, 1963.
5. Буткевич Г. В. Дуговые процессы при коммутации электрических систем. М., «Энергия», 1967.
6. Физика взрыва. М., «Наука», 1975.
7. Зельдович Я. Б., Райзер Ю. П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. М., «Наука», 1966.
8. Lee T. H. Физика плазмы и размыкание электрических цепей.— «Труды Ин-та инженеров по электротехнике и радиоэлектронике», 1969, т. 57, № 3.

УДК 621.316.53.022 + 621.316.53.027.3

### КОММУТАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЗРЫВНЫХ РАЗМЫКАТЕЛЕЙ С БЫСТРЫМ РАЗРУШЕНИЕМ КОНТАКТНОГО ЭЛЕМЕНТА

*Э. А. Азизов, Н. А. Ахмеров, К. И. Козорезов,  
В. В. Семченко  
(Москва)*

Расширение области применения индуктивных накопителей, в том числе для получения мощных электронных пучков и питания плазменно-динамических систем с энергией более 1 МДж связано с созданием ультранизкоомных ( $\sim 10^{-6}$  Ом) коммутаторов с мощностью  $10^{11}$ — $10^{12}$  Вт и фронтами переключения  $10^{-6}$ — $10^{-7}$  с. Кажется, что такие коммутаторы можно создать, используя принцип быстрого разрушения контактного элемента взрывом заряда ВВ [1, 2]. Однако на этом пути возникает ряд проблем, которые могут быть решены только экспериментально:

1. Какой должна быть длина разрушаемой части контакта при заданном напряжении коммутации и как она зависит от тока и геометрии. Полученные до настоящего времени так называемые «холодные» (без размыкания тока) характеристики электрической прочности продуктов взрыва в области разрушения мало пригодны для выбора длины контактного элемента. Данные же о величине коммутационного напряжения при размыкании токов более 10 кА практически отсутствуют.

2. Каким может быть минимальное время переключения, определяемое процессами взаимодействия продуктов взрыва с дугой, возникающей в местах разрушения.

3. Связь соотношения масс заряда ВВ  $M_s$  и контактного узла  $m$   $\alpha = m/M_s$  с мощностью коммутации при заданной термостойкости