

ИССЛЕДОВАНИЕ ГАШЕНИЯ РАЗВИТОЙ ДУГИ УДАРНЫМ СЖАТИЕМ ПРОДУКТАМИ ВЗРЫВА

П. И. Зубков, Л. А. Лукьянчиков, К. А. Тен
(Новосибирск)

В работе [1] показано, что сжатие электрической дуги ударными волнами (УВ) может эффективно использоваться для ее гашения и переключения больших токов. Ниже приведены эксперименты, поставленные с целью дальнейшего исследования физической картины процесса.

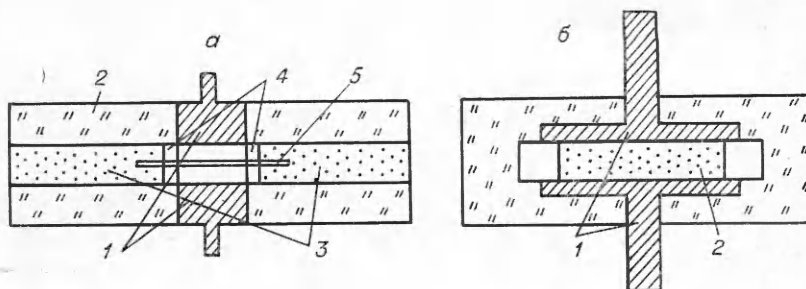
Гашение электрической дуги проводилось в прямоугольном канале (фиг. 1, а), образованном медными электродами 1 и стенками из оргстекла 2. Вдоль канала дуга ограничивалась по размерам электродов (20 мм) взрывчатым веществом (ВВ) 3, используемым для создания УВ. Ширина канала 10 мм, расстояние между электродами 15 мм.

С целью увеличения площади контактного разрыва между продуктами детонации и плазмой дуги использовалась также конструкция с цилиндрическим каналом (фиг. 1, б, где электроды 1 диаметром 35 мм, расстояние между ними 10 мм, заряд 2 диаметром 30 мм, наружный диаметр канала 40 мм). Инициирование цилиндрических зарядов проводилось в центре через отверстие в одном из электродов.

В плоских каналах использовался насыпной тэн, отделенный от дуги пластифицированным ВВ ЭВВ-8Г 4 толщиной 6 мм, в цилиндрических — использовались прессованные заряды из тэна и гексогена с добавками, влияющими на их электропроводность, и литые ТГ 50/50.

Эксперименты проводились в двух схемах индуктивных накопителей (фиг. 2, а, б), их параметры составляли $L_0 = 11,1$ мкГ, $L_1 = 2,6$ мкГ, $L_2 = 2$ мкГ, $R_n = 1,09$ Ом для первого и $L_0 = 22$ мкГ, $L_1 = 1,2$ мкГ, $L_2 = 0,3$ мкГ, $R_n = 0,8-3,2$ Ом для второго вариантов. Исследуемый канал R_B включался в цепь питания накопителя, запитываемого от батареи конденсаторов емкостью 880 мкФ. Величина тока в цепи варьировалась изменением начального напряжения.

В экспериментах, проводимых по схеме фиг. 2, а, измерялся ток в цепи и в нагрузке. В случае фиг. 2, б измерялись ток в цепи, содержащей исследуемый канал, и его производная и ток в нагрузке. По измеренным токам и производной численно на ЭВМ рассчитывался ток в нагрузке, сопротивление угасающей дуги, напряжение на ней и мощность, выделяющаяся в канале при гашении. Вычисленное значение тока в нагрузке отличалось от измеренного не более чем на 5%. В плоских каналах велась также фоторегистрация процесса, расположение щели СФР 5 показано на фиг. 1, а. Промежуток перед экспериментом закорачивался тонким медным



Фиг. 1

проводником, взрывающимся под действием запитываемого накопителя тока.

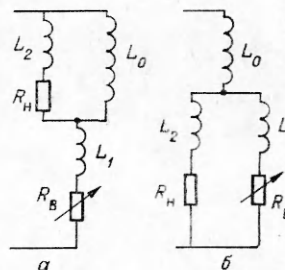
Инициирование зарядов проводилось таким образом, чтобы сжатие дуги происходило в момент достижения током в цепи максимального значения. Максимумы тока в цепи и накопителе в схеме фиг. 2, б при указанных параметрах практически совпадали.

Эксперименты по схеме фиг. 2, а. На фиг. 3, 4 приведены характерные осциллограммы (верхний луч — ток в нагрузке 2,2 кА/дел., нижний — ток в цепи 5 кА/дел., развертка 25 мкс/дел.) и фоторазвертка процесса в плоском канале, на которой видна горящая дуга 1, детонационные волны 2, распространяющиеся по ВВ навстречу друг другу и формируемые ими УВ в токопроводящем канале. Интенсивность свечения сжатой части дуги резко возрастает. После столкновения УВ светящаяся область несколько расширяется, затем интенсивность свечения падает и через некоторое время совсем исчезает.

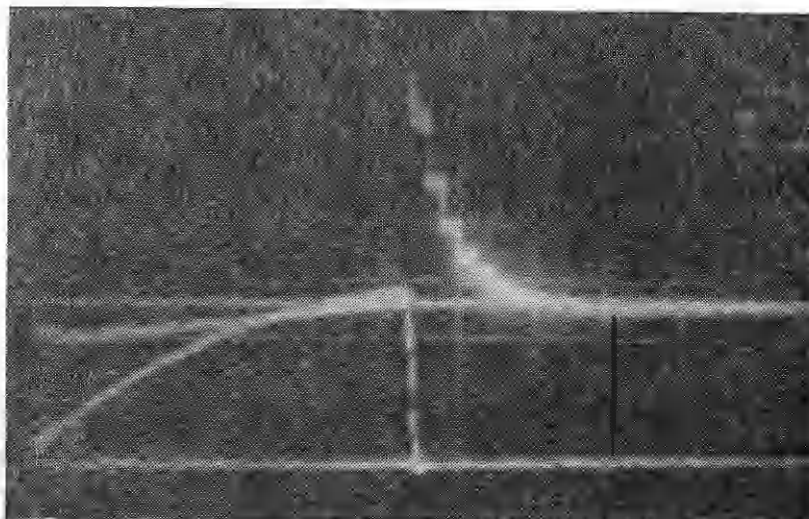
Скорость УВ практически не зависит от тока и лежит в пределах 9—10 км/с. За фронтом волны видна четкая линия, соответствующая скорости около 7 км/с и отделяющая область интенсивного свечения от размытого на границе с продуктами детонации. Расширяющаяся после столкновений УВ светящаяся область имеет размытые границы и перед угасанием разделяется на несколько каналов.

На осциллограммах виден резкий спад тока и соответствующий рост тока в нагрузке, после достижения максимума которым при полном гашении дуги следует LR -разряд.

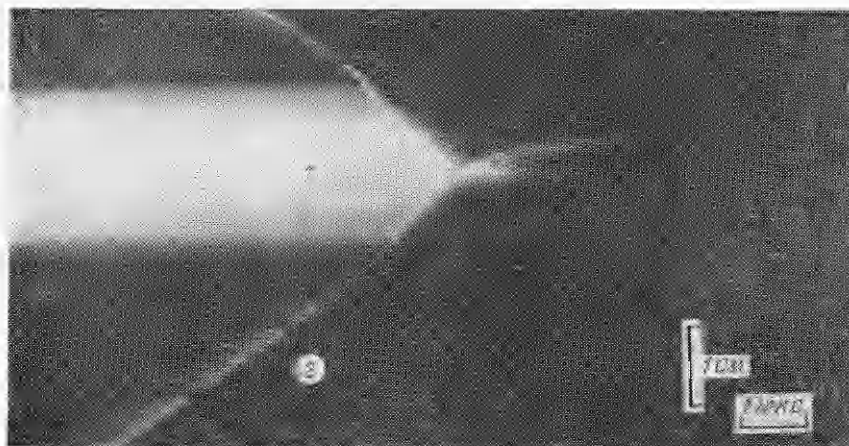
В таблице (столбец 1 соответствует данным фиг. 1, а) приведены ток в цепи $I_{\text{ц}}$ в начале сжатия, максимальный ток в нагрузке $I_{\text{н}}$, максимальное напряжение $U_{\text{в}}$ на промежутке, максимальная мощность W , выделяющаяся в сжимаемой дуге, и время гашения τ , определенное по началу спада тока и достижению им осциллографического нуля. В тех случаях, когда в промежутке возникал пробой, определялось время достижения максимального напряжения. В таблице оно отмечено звездочкой.



Ф и г. 2



Ф и г. 3



Ф и г. 4

С увеличением тока увеличивается время гашения и максимальное напряжение на исследуемом промежутке. При токе 18 кА максимальное напряжение на промежутке достигает 20 кВ и характер процесса меняется. Возникает ситуация, похожая на пробой. Ток в цепи вначале резко возрастает, затем медленно падает за времена в несколько десятков микросекунд.

Сопротивление промежутка ~ 1 Ом и медленно растет.

В серии экспериментов для ограничения ионизированной области вместо одного из зарядов устанавливалась стенка из оргстекла. В этом случае характеристики процесса несколько ухудшаются. Для сравнения в таблице приведены данные для тока 12 кА.

Необходимо отметить, что пробой промежутка никак не фиксируется на фоторазвертке. Видимо, область, охваченная пробоем, имеет малые размеры и скрыта непрозрачными продуктами детонации.

В таблице приведены и результаты экспериментов по гашению дуги в цилиндрическом канале с использованием литых зарядов из ТГ 50/50 (столбец 2 соответствует данным фиг. 1, б). Время гашения при тех же токах уменьшилось, возросла мощность, выделяющаяся в промежутке, и возросло максимальное напряжение на нем. Теперь характер процесса стал меняться при напряжении около 50 кВ. Использование в экспериментах массивной оболочки изолятора привело к увеличению максимального напряжения до 67 кВ.

Важную роль в процессе гашения дуги в цилиндрическом канале играет шунтирование ее собственной проводимости продуктов детонации. Для выяснения роли шунтирования были поставлены специальные эксперименты с прессованными зарядами из тэна и гексогена с 10%-ными и 20%-ными добавками фторопласта и парафина, различных смесей тротила с гексогеном и чистого тротила.

	1						2			
$I_{\text{д}}, \text{кА}$	5,5	12	12	18	24	30	5,5	15	23	24
$I_{\text{н}}, \text{кА}$	4,9	8,9	8,5	13	11	9	5,0	13	14	17
$U_{\text{д}}, \text{кВ}$	15	18	17	20	19	19,5	16	29	51	67
$W, \text{МВт}$	48	121	98	186	340	413	78	195	521	754
$\tau, \text{мкс}$	2,9	3,2	3,0	2,5*	2,1*	1,7*	2,5	1,8*	1,3*	1,2*

В этих экспериментах было выяснено, что в конструкции фиг. 1, б тэн и гексоген с фторопластом имеют за фронтом детонации проводящую зону ~ 1 мм, с добавками парафина проводимость падает с характерным газодинамическим временем ~ 1 мкс, характерное время изменения проводимости у тротила больше 5 мкс и не определяется газодинамическим разлетом.

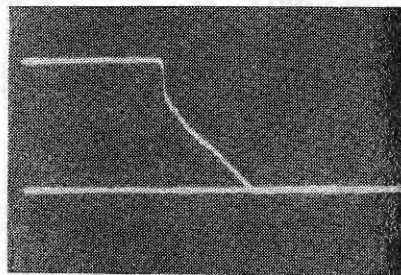
При гашении дуги зарядами с добавками фторопласта наблюдается резкий спад тока в цепи за время 1 мкс, затем излом и более плавное уменьшение до нуля за время около 10 мкс. В момент излома достигается максимальное напряжение 30 кВ, затем оно падает и остается практически постоянным на уровне 10 кВ. Осциллограмма процесса на фиг. 5 (5 кА/дел., 5 мкс/дел.).

Для зарядов с добавкой парафина спад тока носит плавный характер, максимальное напряжение достигается в середине спада и составляет 35 кВ. При гашении дуги с током 30 кА характерные изломы появляются через 2,5 мкс при напряжении 50 кВ и незначительном токе через промежуток.

При использовании зарядов из тротила ток через промежуток уменьшается более плавно, изменение характера процесса начинается через 6—10 мкс при напряжении 20 кВ. После характерного излома ток через промежуток может возрасти.

Результаты экспериментов с зарядами из смеси гексогена с тротилом лежат в промежуточной области между результатами с чистым тротилом и гексогеном с парафином. Изоляция электродов фторопластом от продуктов детонации приводит к результатам, близким для зарядов с фторопластом.

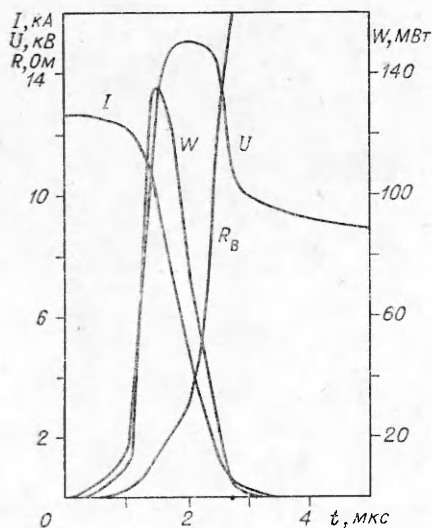
Эксперименты по схеме фиг. 2, б. В основном проводились экспери-



Ф и г. 5



Ф и г. 6



Фиг. 7

параметрах до момента выхода УВ на противоположную стенку. На фиг. 6, 7 приведены синхронизированная фоторазвертка процесса и результаты обсчета производной тока. Стрелка на фоторазвертке соответствует началу графика на фиг. 7. Заметное изменение параметров начинается после отражения УВ от стенки. Напряжение U в течение времени ~ 1 мкс достигает максимального значения и остается на этом уровне до полного угасания дуги, затем падает до величины, определяемой током в нагрузке. Мощность W , выделяющаяся в промежутке, имеет характерный максимум, достигаемый за такое же время, после которого падает до нуля к моменту угасания. Сопротивление промежутка R_B постоянно растет, особенно быстро после начала уменьшения мощности.

Обсуждение результатов. Результаты экспериментов по гашению дуги в плоском и цилиндрическом каналах с зарядами, продукты детонации которых обладают низкой и быстроспадающей проводимостью, а также тот факт, что угасание начинается в момент, близкий к моменту отражения УВ от противоположной стенки, позволяют сделать вывод, что потеря проводимости плазмы дуги и ее распад могут произойти в результате только сжатия ее УВ и взаимодействия с толкающим поршнем.

Собственная проводимость продуктов детонации, шунтирующая токопроводящий канал и спадающая со временем в результате газодинамического разлета, поддерживает процесс угасания, затягивая рост напряжения на промежутке. В случае с тротилом спад тока обусловлен спадом проводимости продуктов детонации. Пробой промежутка при 20 кВ через 6—10 мкс после начала спада тока не ясен. Во всех описанных выше экспериментах обращает на себя внимание уровень мощности, рассеиваемой при гашении. Он на два порядка выше уровня в невозмущенной дуге. Ясно поэтому, что ни одним механизмом теплопроводности в чистом виде нельзя объяснить охлаждение, потерю проводимости и распад плазмы дуги после сжатия ее УВ.

По-видимому, основную роль в процессе гашения дуги играют развивающиеся на контактной поверхности гидродинамические неустойчивости.

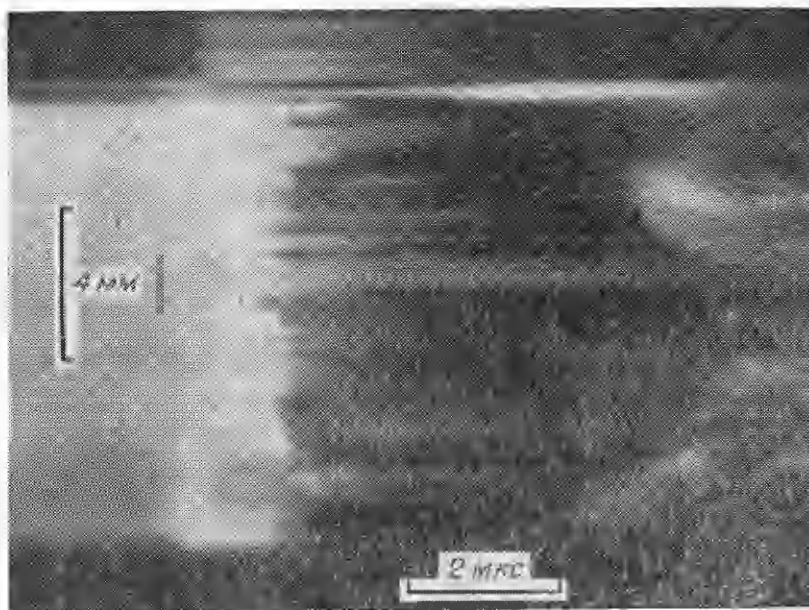
О наличии развивающихся неустойчивостей можно судить по размытой границе между продуктами детонации и светящейся проводящей областью, а также по разделению сжатого УВ токопроводящего канала на несколько перед угасанием.

менты с плоским каналом и нагрузкой накопителя 0,8 Ом. Проводилась синхронизированная фоторегистрация процесса с осциллографированием производной тока в цепи исследуемого промежутка. Записывались также токи в промежутке и в нагрузке.

Синхронизация осуществлялась датчиком, расположенным на известном расстоянии от промежутка и работающим на замыкании зоной проводимости за детонационным фронтом. Точность синхронизации не хуже 0,05 мкс.

В этих экспериментах один из зарядов был заменен стенкой из оргстекла.

В исследуемой постановке сжатие токопроводящего канала практически не сказывается на токе в промежутке, его сопротивлении и других



Ф и г. 8

Экспериментально гидродинамические неустойчивости контактной поверхности при прохождении ее УВ исследовались в [2], теоретически — в [3]. В описанных экспериментах возможны и другие типы неустойчивостей, например рэлей-тейлоровская. Неоднородность температуры в дуге приводит к неоднородности и плотности и к градиентным ускорениям УВ и контактных поверхностей, в результате чего они могут оказаться неустойчивыми.

На фиг. 8 приведена фоторегистрограмма процесса гашения в плоском канале, снятая через стенку из оргстекла, ограничивающую дугу вместо одного из зарядов ВВ. Сильная неоднородность свечения сжатой дуги может быть связана с развитием неустойчивостей на ее контактной границе с продуктами детонации.

Высказанные предположения подтверждают эксперименты, проведенные по схеме фиг. 2, а в плоском канале при давлении в плазме дуги, близком к атмосферному. В этом случае время гашения уменьшается приблизительно в 2 раза, а максимальное напряжение, выдерживаемое промежутком, возрастает в 1,6 раза.

Размер неустойчивостей в направлении распространения УВ, по-видимому, того же порядка, что и поперечный размер сжатой дуги. Поэтому уменьшение начального размера дуги должно приводить к более высоким параметрам гашения, что и наблюдалось в экспериментах с цилиндрическим каналом.

Развивающиеся неустойчивости на контактной поверхности приводят к значительному увеличению ее площади, что увеличивает поток энергии за счет лучистой теплопроводности, способствует мелкомасштабному перемешиванию продуктов детонации с плазмой дуги, ее охлаждению и распаду. Как показывают оценки, продукты детонации в цилиндрическом канале могут поглотить без изменения своих свойств около 600 Дж.

Авторы выражают признательность А. П. Ершову, А. Л. Куперштоху, А. А. Кузовникову за полезные обсуждения и помощь в проведении некоторых экспериментов.

Поступила 9 VII 1980

ЛИТЕРАТУРА

1. Зубков П. И., Лукьяничков Л. А., Тен К. А. О гашении электрической дуги с помощью взрывчатых веществ.— ПМТФ, 1978, № 4.
2. Мешков Е. Е. Неустойчивость границы раздела двух газов, ускоренной ударной волной.— Изв. АН СССР. МЖГ, 1969, № 5.
3. Сизонов В. С. Поведение поверхности раздела двух жидкостей конечной глубины в переменных силовых полях.— ПМТФ, 1970, № 5.

УДК 538.6

ОБ УЧЕТЕ ЗАВИСИМОСТИ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ ОТ ДАВЛЕНИЯ В СВЕРХСИЛЬНЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЯХ

Б. А. Бойко, С. П. Роцункин
(Москва)

Получение сверхсильных импульсных магнитных полей методом обжата начального потока металлической оболочки, ускоренной продуктами взрыва ВВ, ограничивается в основном двумя процессами: динамикой сжатия и диффузией поля, связанной с конечной электропроводностью σ лайнера. Характер изменения электропроводности от физических свойств среды (плотности ρ и удельной тепловой энергии q) существенно влияет на результаты теоретических расчетов [1—3]. В области высоких температур, а также больших и малых плотностей зависимость электропроводности металлов от q и ρ недостаточно изучена. Поэтому в основном используются полуэмпирические соотношения, например

$$\sigma = \sigma_0(1 + \beta q)^{-1} [2], \quad \sigma = \sigma_0(1 + \beta q)^{-1}(\rho/\rho_0)^n [3,4],$$

которые экстраполируются на область плотностей и температур, возникающих в среде при получении сверхсильных магнитных полей. В работе [2] показано, что результаты численных расчетов в предположении зависимости электропроводности меди только от джоулева нагрева хорошо согласуются с экспериментальными в области полей $H \leq 3$ Мэ. Довольно полно численные расчеты верхних теоретических пределов магнитных полей приведены в работе [3], где показано, что для $H > 10$ Мэ эксперимент согласуется с результатами вычислений только тогда, когда учитывается зависимость электропроводности оболочки как от джоулева тепла, так и от плотности в области сжатия. Отмечена сравнительно слабая зависимость максимальной величины поля от джоулева тепла. Так, произвольное изменение теплового коэффициента β в 3 раза не привело к лучшему согласованию результатов расчетов [3] с экспериментальными.

Поля напряженностью $H > 10$ Мэ оказывают на проводник давления $p > 4 \cdot 10^{11}$ Па, что приводит к увеличению плотности и, следовательно, возрастанию электропроводности некоторых металлов [5, 6]. Как показывают оценки, изменение электропроводности вследствие нагрева более чем на порядок превосходит соответствующее изменение из-за давления. Поэтому, учитывая вышеизложенное, представляет интерес выяснить, в каких случаях поправка в изменение электропроводности вследствие давления может оказаться существенной.

Исследование проникновения сверхсильных магнитных полей в проводник осложняется нелинейными эффектами, связанными с уменьшением его электропроводности при нагреве и испарении и увеличением ее из-за роста плотности при повышении давления, и возможно в общем случае только численными методами. Отдавая должное численным расчетам, отметим, что они не позволяют оценить качественные закономерности. Аналитическое решение, даже полученное за счет сильного упрощения задачи, при учете, однако, основных физических процессов дает более глубокое понимание явлений и облегчает проведение в дальнейшем более точных машинных расчетов.

В связи с этим, отвлекаясь от динамических ограничений и считая известными некоторые параметры оболочки (электропроводность, уравнение состояния), рассмотрим задачу о влиянии давления на величину магнитного поля при обжатии последнего металлическими стенками лайнера и приведем качественные аналитические соотношения, позволяющие оценить это влияние.