

ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ДЕТОНАЦИОННОЙ ПЛАЗМЫ И БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИЕ ВЗРЫВНЫЕ РАЗМЫКАТЕЛИ ТОКА

А. П. Ершов, П. И. Зубков, Л. А. Лукьянчиков

(Новосибирск)

За фронтом детонации (ФД) конденсированных взрывчатых веществ (ВВ) образуется плазма с электропроводностью $\sim 1 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$ [1]. Проводящая область делится на две части [2, 3]: неравновесную (зону химической реакции шириной $\sim 1 \text{ мм}$) и равновесную. Равновесная электропроводность может быть порядка неравновесной или гораздо ниже и быстро падает в волнах расширения.

Движение проводящей зоны за ФД со скоростью 5—8 км/с можно использовать для размыкания сильноточных цепей за времена $\leq 1 \text{ мкс}$. Такие размыкатели могут найти применение в мощных источниках энергии. Быстродействие существующих способов взрывного размыкания ($\sim 10 \text{ мкс}$ [1]) ограничено возникновением дуг при разрыве цепи.

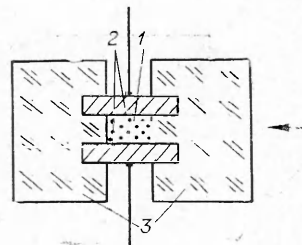
В предлагаемом способе проводящая зона движется за ФД между двумя электродами. Ток течет по плазме и прекращается, когда ВВ между электродами прореагирует и электропроводность упадет. Значительная электрическая прочность продуктов детонации [5] препятствует пробое промежутка и образованию дуги. Поэтому время размыкания определяется спадом электропроводности за ФД, при минимальной проводящей зоне (зона реакции) составляет $\sim 0,1 \text{ мкс}$. Для применения нового способа размыкания необходимы вольт-амперные характеристики плазмы при больших плотностях тока. Эти данные могут быть полезны и для выяснения механизма проводимости плазмы.

Эксперименты. Источником напряжения была конденсаторная батарея (25 мкФ, 30 кВ). Средняя точка батареи заземлялась, и обе половинки заряжались до напряжений противоположной полярности. Такая схема позволила снизить требования к вводам напряжения во взрывную камеру.

Сечение заряда показано на фиг. 1. Взрывчатое вещество 1 ($3 \times 5 \text{ мм}$, длина 12—15 см) находилось между медными электродами 2 длиной 10 см. Напряжение на заряде и ток осциллографировались с компенсацией индуктивных наводок [6, 7]. Через стенку 3 из оргстекла велась фоторегистрация на СФР.

Заряд подключался к батарее разрядниками после контакта электродов с проводящей зоной за ФД. Электроды защищались от пробоя впереди ФД 2—4 слоями лавсановой пленки толщиной 25 мкм. За ФД под действием высокого давления сопротивление пленки становилось малым по сравнению с сопротивлением R плазмы.

После подключения батареи ток и напряжение на заряде нарастали за время $\sim L/R$ ($L = 4 \text{ мкГ}$ — индуктивность цепи). На этом участке определялась вольт-амперная характеристика. При определенном напряжении между электродами происходил пробой. Затем с некоторой задержкой взрывался



Ф и г. 1

проводник, включенный последовательно с зарядом. Это использовалось для привязки фоторазвертки и осциллограмм с точностью не хуже 1 мкс (пробой не всегда виден на фоторазвертке).

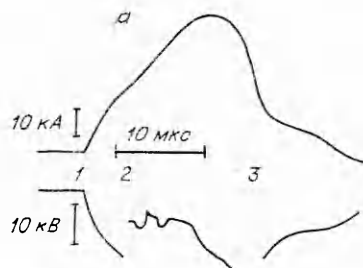
Исследовались порошковый гексоген, имеющий электропроводность около $0,2 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$ в зоне $\approx 1 \text{ мм}$, и два пластических ВВ — ЭВВ 8Г

Т а б л и ц а 1

ВВ	ЭВВ 8Г	Семтекс	Гексоген
$R, \text{ Ом}$	1,1 (0,01)	3,3 (0,01—5)	20 (0,05)
(при $U, \text{ кВ}$)	1,0 (5—12)	2,0 (27)	20 (10)
$E, \text{ кВ} \cdot \text{см}^{-1}$	40	90	>70

и семтекс Л (производство ЧССР). Ширина проводящей зоны у пластиков в условиях эксперимента была $\approx 3 \text{ мм}$, электропроводность — 1,2 и $0,71 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$ соответственно. Результаты измерений приведены в табл. 1 (в скобках указано напряжение, соответствующее измеренному сопротивлению).

У пластических ВВ вольт-амперная характеристика проводящей зоны близка к прямой. Электрическая прочность плазмы E у этих ВВ определялась по напряжению пробоя, происшедшего в проводящей зоне. При этом дуга движется вместе с ФД, незначительно усиливая его свечение. На фиг. 2 приведены осциллограмма (а) и фоторазвертка (б) опыта с ЭВВ 8Г. На этой и последующих фигурах цифрой 1 обозначен момент



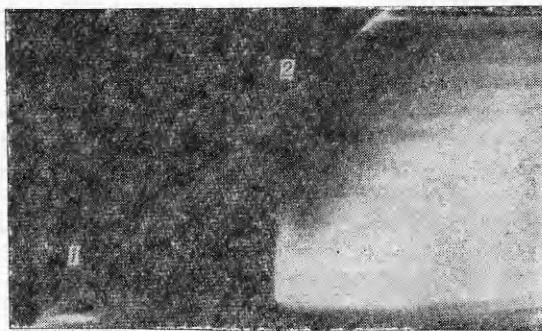
Ф и г. 2

подачи напряжения, 2—пробой, 3 — взрыв проводника; метки на фоторазвертке — через 1 см.

Пробой мог произойти при меньших напряжениях между концами электродов, если в этом месте продукты детонации успевали расшириться и электрическая прочность падала [5] до значений ≤ 10 кВ·см⁻¹. Например, у семтекса такой пробой наступал при напряжении от 14 до 25 кВ в момент, когда детонационная волна проходила 7—8 см вдоль электродов. Пробой в проводящей зоне происходил, если до этого момента напряжение возрастало до 27 кВ. Фоторазвертка опыта с семтексом приведена на фиг. 3.

У гексогена время L/R было малым, измерения велись при постоянном напряжении. Сопротивление не зависело от напряжения в интервале

50 В — 10 кВ. При напряжении, большем 10 кВ, в момент подключения заряда ионизуется воздух в порах в нескольких миллиметрах впереди ФД (фиг. 4). Это связано с искажениями поля впереди ФД. Так как позади ФД лавсановая пленка проводит, электрическое поле близко к однородному; впереди фронта в порошке гексогена возникает поле той же величины. Это при $U > 10$ кВ ($E > 30$ кВ·см⁻¹) приводит к пробую порошка.



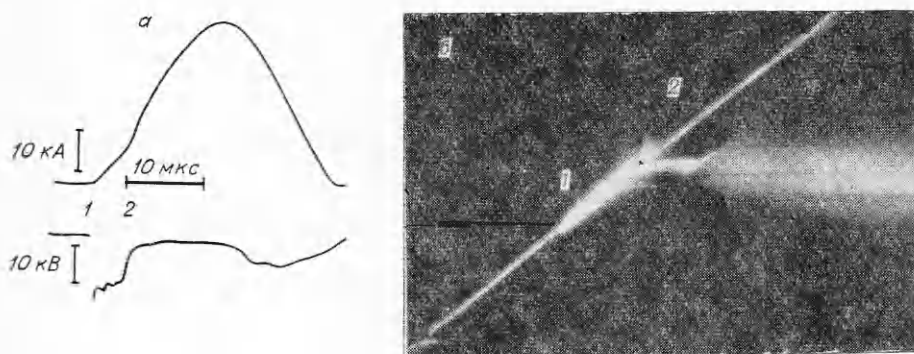
Фиг. 3

Вдали от ФД искажения поля малы, и детонационная волна ведет перед собой ограниченную ионизованную область. Ток растет линейно со временем с момента подачи напряжения (фиг. 4, а). Это значит, что ионизация впереди ФД приводит к появлению равновесной проводимости продуктов детонации, не спадающей при расширении. Поэтому проводящая зона с момента подачи напряжения расширяется со скоростью детонации, а сопротивление заряда падает $\sim t^{-1}$. Напряжение на заряде меньше, чем на батарее, на величину LdI/dt , т. е. почти постоянно. Ток, протекающий впереди ФД по порошку, мал по сравнению с током через проводящую область за ФД: линия тока должна дважды пересекать ФД из-за изоляции впереди фронта. Энерговыведение впереди волны не превышает долей процента от детонационного. С некоторой задержкой позади ФД происходит пробой с почти неподвижной дугой. К этому моменту проводящая зона расширяется в 5—50 раз. В табл. 2 в зависимости от напряжения на батарее U_0 приведены напряжение на заряде, время задержки пробоя, сопротивление к моменту пробоя и средняя электропроводность в растянутой проводящей зоне. Эта электропроводность того же порядка величины, что и собственная у гексогена.

Напряжение 21 кВ держится 1 мкс. Можно думать, что опережающая ионизация уменьшает электрическую прочность; при подаче напряжения после того, как ВВ вступит в реакцию, электрическая прочность должна быть не ниже 70 кВ·см⁻¹ (см. табл. 1).

Полученные значения E вблизи ФД того же порядка, что измеренные в [5] при расширении продуктов детонации.

Разгон детонационной волны. Джоулево тепловыделение у семтекса достигало 40% детонационного, у ЭВВ 8Г — 15%. Это существенно не влияло на детонационный процесс. У семтекса наблюдалось увеличение скорости волны D на 3—4% при максимальном разогреве (см. фиг. 3).



Ф и г. 4

Малая величина разгона связана с распределением внутренней энергии на упругую и тепловую части, меняющимся при нагреве. По увеличению скорости волны можно оценить коэффициент Грюнайзена продуктов детонации (для семтекса $\Gamma \approx 0,4$). При этом тепловая составляющая давления $\approx 6\%$, а тепловая часть энергии около 25% полной (без разогрева). Выделение джоулева тепла (по оценке) повышает температуру вдвое; за ФД возникает светящаяся зона шириной ≈ 6 мм.

Повышенная ($13 \text{ км} \cdot \text{с}^{-1}$) скорость детонации наблюдалась в [8] при инициировании порошка гексогена взрывом фольги. Это явление связано не с джоулевым разогревом продуктов (эффект мал), а, по-видимому, с опережающим волну разрядом по порошку, который при достаточной мощности мог инициировать ВВ. На фиг. 4, б в момент подачи напряжения фронт свечения опережает ФД со скоростью также $\approx 13 \text{ км} \cdot \text{с}^{-1}$. В данном случае инициирования не происходило (слабый источник), и детонация проходит через светящуюся область, «не замечая» ее.

Механизмы проводимости. Двукратный рост температуры, как видно из табл. 1, слабо влияет на электропроводность пластиков. Величину и слабую температурную зависимость равновесной электропроводности

Т а б л и ц а 2

U_0 , кВ	15	20	25	30
U , кВ	13	13	18	21
t , мкс	7,5	4	2	1
R , Ом	2,4	1,7	4,5	3,5
σ , Ом $^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$	0,07	0,2	0,15	0,4

можно было бы объяснить полной ионизацией малой примеси, например NO. Но тогда потенциал ионизации должен уменьшиться на 8—9 эВ. Оценки, подобные изложенным в [9], дают 2—4 эВ. Поэтому электронно-ионный состав заряженной компоненты плазмы маловероятен. Равновесная проводимость либо ионная [10], либо связана с конденсацией свободного углерода [3].

Малые энергетические воздействия сильно влияют на проводимость гексогена, что говорит в пользу электронно-ионной проводимости. Однако следует подчеркнуть, что причина появления равновесной проводимости при движении волны по ионизованному веществу неясна. Расширение продуктов не приводит к быстрому спаду проводимости, что отличает

этот эффект от известных [11] (проводящая зона на порядок больше поперечника заряда при слабой оболочке).

Размыкатели. В модельных экспериментах заряд семтекса толщиной 3 мм, диаметром 55 мм находился между электродами диаметром 40 мм и инициировался в центре. На электроды подавалось напряжение до 15 кВ с конденсаторной батареи 75 мкФ, индуктивность цепи ≈ 2 мкГ. После выхода детонации из межэлектродного пространства начинался разлет продуктов и падение проводимости. Ток 15 кА выключался за 2 мкс, максимальное напряжение 30 кВ, вес заряда около 10 г. Перфорированные заряда ускоряют размыкание. В аналогичной постановке [12] ток 10 кА выключен за 0,75 мкс зарядом гексогена весом 100 г.

Результаты данной работы позволяют оценить возможности размыкания с использованием движения проводящей зоны за ФД. При ширине проводящей зоны $\Delta \sim 1$ мм (зона реакции) минимальное время размыкания $\sim 0,1$ мкс. Минимальное количество ВВ (для цилиндрического слоя толщины Δ) $m \sim \rho U/E \cdot I/\sigma E$, где UI — переключаемая мощность; σ и E — электропроводность и электрическая прочность плазмы. Для семтекса при $UI \sim 10^{12}$ Вт $m \sim 300$ г. Начальное сопротивление размыкателя при этом $r \sim UI$. Уменьшить r и напряжение до размыкания можно, увеличивая радиус и вес заряда ($m \sim r^{-1}$). Такой размыкатель полезен как обостритель, облегчающий до спада проводимости работу взрывного размыкателя с разрывом цепи (гашение дуг при низком напряжении).

Поступила 16 XI 1976

ЛИТЕРАТУРА

1. Бриш А. А., Тарасов М. С., Цукерман В. А. Электропроводность продуктов взрыва конденсированных взрывчатых веществ.— ЖЭТФ, 1959, т. 37, вып. 6.
2. Ершов А. П., Зубков П. И., Лукьянчиков Л. А. Об измерениях профиля электропроводности во фронте детонации конденсированных ВВ.— ФГВ, 1974, т. 10, № 6.
3. Ершов А. П. Ионизация при детонации конденсированных ВВ.— ФГВ, 1975, т. 11, № 6.
4. Кнопфель Г. Сверхсильные импульсные магнитные поля. М., «Мир», 1972.
5. Зубков П. И., Лукьянчиков Л. А., Рябинин Ю. В. Электрическая прочность разлетающихся продуктов детонации.— ПМТФ, 1976, № 1.
6. Зубков П. И., Лукьянчиков Л. А. Электрический разряд в порошковом тэне.— ПМТФ, 1970, № 4.
7. Лукьянчиков Л. А., Киселев Г. И. Компенсационный способ измерения импульсного тока и напряжения.— «Приборы и техника эксперимента», 1974, № 4.
8. Бабуль В., Корзун М. Электрический метод поверхностного возбуждения бризантных ВВ.— ФГВ, 1975, т. 11, № 1.
9. Зельдович Я. Б., Райзер Ю. П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. М., Физматгиз, 1963.
10. Дремин А. Н., Якушев В. В. Природа электропроводности продуктов детонации конденсированных взрывчатых веществ.— «Докл. АН СССР», 1975, т. 221, № 5.
11. Антипенко А. Г., Дремин А. Н., Якушев В. В. О зоне электропроводности при детонации конденсированных взрывчатых веществ.— «Докл. АН СССР», 1975, т. 225, № 5.
12. Ершов А. П., Зубков П. И., Лукьянчиков Л. А. Использование зоны электропроводности в детонационной волне конденсированных ВВ и электрической прочности продуктов детонации для формирования заданных сильноточных импульсов и выключения больших токов.— В кн.: Динамика сплошной среды. Вып. 16. Новосибирск, изд. Ин-та гидродинамики, 1974.