

**ИНИЦИИРОВАНИЕ ДЕТОНАЦИИ
В ЖИДКИХ ВЗРЫВЧАТЫХ СМЕСЯХ
НЕЗАВЕРШЕННЫМ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ИСКРОВОМ РАЗРЯДОМ**

УДК 662.215.4

Е. В. Зотов

**ВНИИ экспериментальной физики,
607200 Саров**

Проведено экспериментальное исследование электроискрового инициирования детонации в растворах ряда нитросоединений в высококонцентрированной азотной кислоте. При ограничении длительности импульса напряжения, приложенного к искровому разряднику, зафиксирован процесс возбуждения детонации незавершенным разрядом (лидерное инициирование). Установлены основные закономерности лидерного инициирования. Результаты экспериментов подтверждают гипотезу, согласно которой начальный разогрев определяется локальной напряженностью электрического поля у головки лидера. Указанный механизм может быть справедлив при электроискровом инициировании жидких взрывчатых смесей с электролитическими и диэлектрическими свойствами, критический диаметр которых сравним с сечением лидера.

Существующие представления об инициировании детонации электрическим разрядом во взрывчатых веществах (ВВ) сводятся к механизму комплексного воздействия нагрева ВВ от плазменного канала разряда и расходящейся от канала ударной волны [1]. К настоящему времени процесс электроискрового инициирования жидких взрывчатых смесей (ЖВС) и ВВ наименее изучен. В проведенных ранее исследованиях применялся в основном энергоемкий накопитель, и исход эксперимента зачастую зависел, например, от прочности и конфигурации сосуда с ЖВС, в котором осуществлялся электрический пробой [2, 3]. В ряде последующих работ изучались основные закономерности возбуждения взрыва при искровом пробое ЖВС, характеризующихся высокой чувствительностью к внешним воздействиям и малым критическим диаметром: растворов нитробензола в тетранитрометане [4] и ряда растворов нитросоединений в высококонцентрированной азотной кислоте [5]. В обеих работах отмечена роль напряжения на разряднике в момент пробоя как параметра, определяющего надежность инициирования ЖВС.

Настоящие эксперименты продолжают исследования [5]. Как и в [5], применялись разрядники с электродными системами острие — острие (О-О) и острие — плоскость (О-П). Острие выполнялось в виде усеченного конуса с углом при вершине 60° и диаметром площадки 0,08 мм, плоскостью является полированный торец цилиндра диаметром 3 мм со скругленными кромками. Расстояние l между электродами устанавливалось под микроскопом и не превышало 1,0 мм. Камера разрядника, заполняемая ЖВС, имела диаметр 6 и высоту 9 мм.

Разрядник подсоединялся между жилой и оплеткой коаксиального кабеля типа РК, и к нему прикладывался импульс напряжения длительностью основной ступеньки не более 500 нс, длительностью фронта 30 нс и с амплитудой до 100 кВ. С помощью высокоскорост-

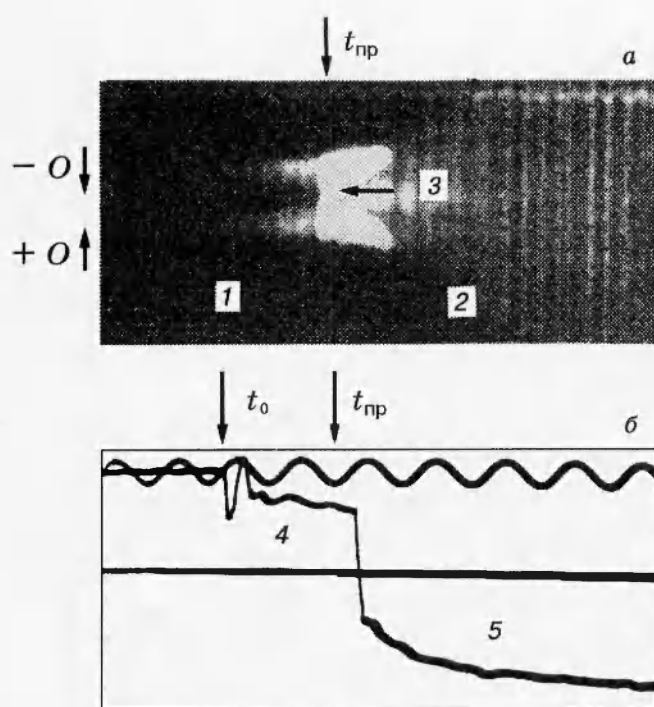


Рис. 1. Характерная фотохронограмма развития пробоя и возбуждения детонации (а) и осциллограмма тока (б) при завершённом пробое:

1 — лидерный процесс; 2 — фронт детонации; 3 — место встречи лидеров и возбуждения детонации; 4 — начальный ток; 5 — ток после пробоя; $t_{пр}$ — момент замыкания межэлектродного промежутка проводящим каналом; t_0 — момент приложения к разряднику импульса напряжения; $T = 20$ (а) и 10 нс (б) — периоды синусоидальных меток

ных осциллографов в каждом опыте измерялись напряжение на разряднике (до его пробоя) и ток, протекающий через разрядник. Сопротивление высоковольтного плеча активного делителя ≤ 1 кОм, сопротивление шунта ~ 1 Ом.

Оптические процессы при пробое и возбуждении детонации регистрировались высокоскоростным регистратором ФЭР-1 с электронно-оптическим преобразователем [6] в режиме щелевой развертки с ориентацией щели вдоль оси электродов.

Эксперименты проводились с ЖВС типа окислитель + горючее, по составу близкими к стехиометрическим или с небольшим отрицательным кислородным балансом. В качестве окислителя применялась азотная кислота (АК) концентрации 98 %, в качестве горючего — динитробензол (ДНБ), тринитробензол (ТНБ) и тринитротолуол (ТНТ). Раствор приготавливался последовательным взвешиванием горючего и готовой смеси. Температура ЖВС и окружающей среды $20 \pm 2^\circ\text{C}$. Продолжительность контакта ЖВС с разрядником < 1 мин.

Все перечисленные растворы имели удельную электрическую проводимость в пределах от $\sim 2,5 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$ (для АК) до $\sim 10^{-3} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$ (для ЖВС АК/ТНБ 47/53), по порядку величины близкую к удельной проводимости обычной водопроводной воды.

Известно [7–9], что поведение электролитов при высокой напряженности поля определяется величиной их низковольтной проводимости. Пробой разрядников, заполненных ЖВС с указанной проводимостью, характеризуется медленным прорастанием лидеров в сторону противоположных электродов со скоростью $u = 2 \div 7$ мм/мкс в диапазоне напряжений $U = 45 \div 80$ кВ при $l = 0,3 \div 0,5$ мм (система О–П). Лидеры появляются практически одновременно на обоих остриях в электродной системе О–О и только на острие в системе О–П. Скорость движения лидеров в опыте постоянна, однако при встрече лидеров в глубине межэлектродного промежутка или при подходе лидера к плоскости она резко увеличивается (так называемый «финальный скачок» [9]). В момент замыкания промежутка проводящим каналом ток через разрядник увеличивается скачком (за единицы наносекунд), напряжение на разряднике уменьшается, а сам канал вспыхивает по всей длине.

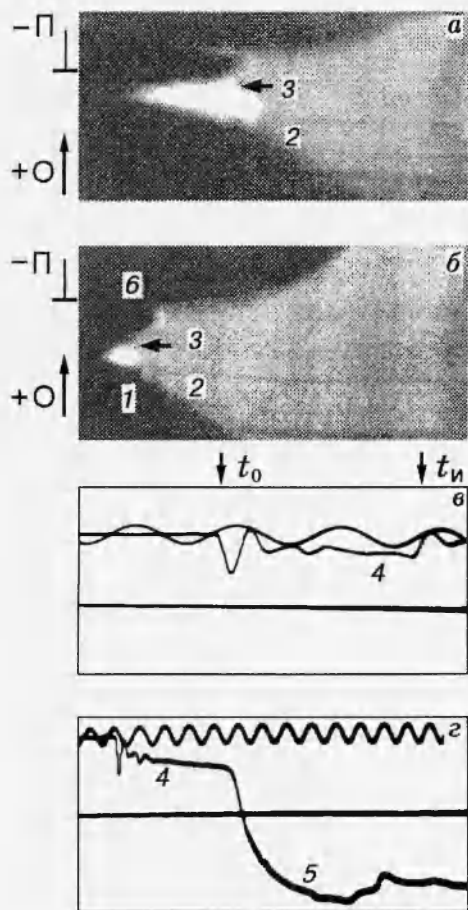


Рис. 2. Характерные фотохронограммы развития пробоя и возбуждения детонации (а, б) и осциллограммы тока (в, г) при незавершенном разряде:

1 — лидерный процесс; 2 — фронт детонации; 3 — место возбуждения детонации; 4 — начальный ток; 5 — конечный ток; 6 — финальный скачок; t_n — момент окончания импульса, $T = 10$ нс

В представленной картине завершенного пробоя детонация ЖВС возникает именно в районе «финального скачка», т. е. в середине межэлектродного промежутка для электродной системы О-О и у плоскости для системы О-П.

На рис. 1,а приведена фотохронограмма возбуждения детонации в ЖВС АК/ДНБ 56/44, полученная при пробое разрядника типа О-О с межэлектродным расстоянием $l = 0,5$ мм, а на рис. 1,б — характерная осциллограмма тока, протекающего через разрядник типа О-П с $l = 0,2$ мм, заполненный тем же ЖВС.

В [5] было показано, что вероятность возбуждения детонации ЖВС при фиксированных начальных условиях (состав ЖВС, тип электродной системы, расстояние между электродами и т. п.) зависит только от напряжения на разряднике в момент замыкания промежутка проводящим каналом. Детонация инициируется в малой области «финального скачка» лидеров. Следовательно, энергия, затраченная на пробой промежутка, существенно превышает энергию инициирования. При этом влияние полной энергии, выделившейся в межэлектродном промежутке с момента приложения к нему напряжения, на процесс развития детонации остается не до конца ясным.

Рассмотрим далее результаты экспериментов при ограничении длительности протекания тока через разрядник. В настоящей работе это достигалось включением параллельно с основным дополнительного «срезающего» разрядника [9]. При пробое «срезающего» разрядника, заполненного инертным жидким диэлектриком, напряжение на основном разряднике через единицы наносекунд уменьшалось до нуля. Следовательно, продолжительность протекания тока через разрядник с ЖВС определяется статистическим разбросом

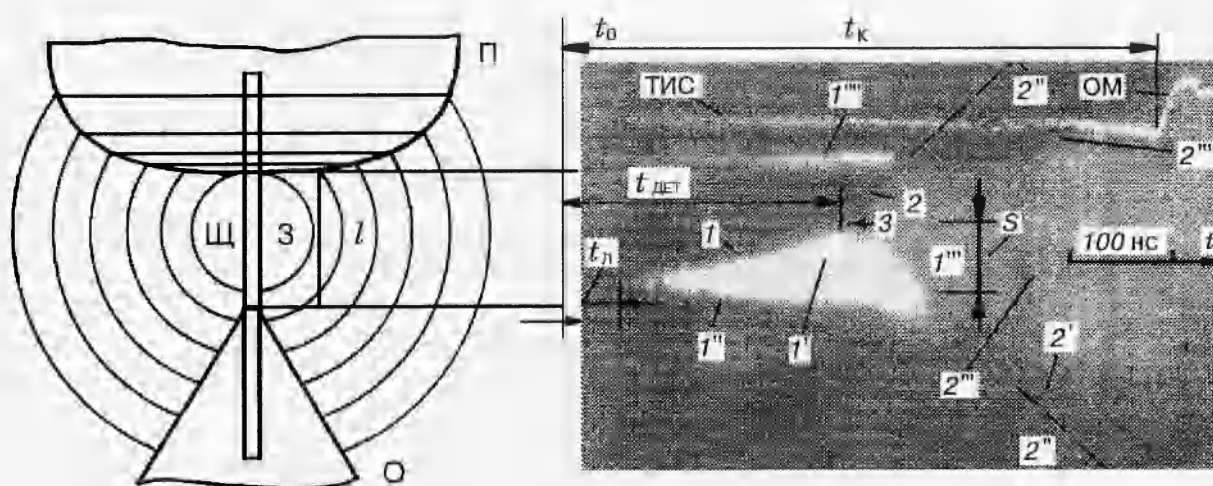


Рис. 3. Условная хронограмма лидерного инициирования ЖВС:

1 — лидер; 1' — движение головки лидера, 1'' — граница канала, примыкающая к электроду «острие»; 1''' — линия отсечки свечения канала фронтом детонации; 1'''' — отражение свечения лидера от полированной поверхности электрода «плоскость»; 2 — фронт детонации; 2' — фазовое перемещение фронта детонации вдоль конусной поверхности электрода «острие»; 2'' — условные линии, соответствующие нормальной скорости детонации; 2''' — свечение фронта детонации в пространстве, вырезаемом входной щелью Щ фоторегистратора; 2'''' — фазовое перемещение фронта детонации вдоль плоской и округленной поверхностей электрода «плоскость»; 3 — место возбуждения детонации

времени пробоя «срезающего» разрядника и в экспериментах изменялась в пределах от 10 до 500 нс. Такой подход позволяет вначале обнаружить процесс возбуждения детонации в ЖВС незавершенным электрическим разрядом, а затем изучить основные его закономерности.

На рис. 2, а, б приведены характерные фотохронограммы развития лидерного процесса и детонации в ЖВС АК/ДНБ 56/44 при незавершенном разряде в разрядниках типа О-П с $l = 0,5$ мм, на рис. 2, в — осциллограмма тока длительностью 20 нс, ограниченной «срезающим» разрядником, в опыте с инициированием той же ЖВС — разрядником типа О-О с $l = 0,2$ мм.

Из рис. 2, а, б видно, что разряд (как уже отмечалось выше) всегда начинается с острия, на котором на стадии зажигания разряда создается напряженность поля, необходимая для развития ионизации в жидкости. Напряженность поля на головке лидера, определяемая потенциалом электрода О, размерами головки и т. д., обеспечивает прорастание лидера в сторону второго электрода. В определенных условиях в канале лидера осуществляется разогрев ЖВС, достаточный для возбуждения саморазвивающейся химической реакции. При подаче на разрядник напряжения меньшей амплитуды U_m лидер проходит большее расстояние до момента инициирования ($U = 65$ (а) и 75 кВ (б)). При дальнейшем снижении амплитуды инициирование осуществляется только в районе «финального скачка» лидера [5]. Если детонация возбуждается в начальной стадии разряда, то в силу того, что скорость детонации в рассмотренных примерах выше скорости движения лидера, замыкание электродов происходит детонационным фронтом. В этом случае пробоя в полном смысле может и не быть (см. осциллограмму тока на рис. 2, г). Однако при приближении детонационного фронта к электроду-плоскости из-за увеличения напряженности электрического поля на участке между фронтом и плоскостью (в опытах без «срезающего»

Некоторые данные по лидерному иницированию ЖВС

ЖВС	l , мм	U , кВ	$t_{л}$, нс	u , км/с	$t_{дет}$, нс	W , МДж	R , Ом
АК/ДНБ	0,3	47	70	4,9	100	440	510
		58	50	5,4	70	460	540
56/44	0,5	59	100	4,3	140	860	600
		71	50	5,1	70	450	810
АК/ТНТ	0,3	64	27	7	45	300	620
		73	20	> 7	30	220	770
53,5/46,5	0,5	67	52	2,5	150	870	780
		77	47	3,9	95	570	930
АК/ТНБ	0,3	57	35	4,5	65	230	820
		47/53	67	30	5,0	55	290

разрядника) снова может произойти пробой ЖВС (см. позицию б на рис. 2,б).

При наличии фоторегистрации, позволяющей различить лидерное иницирование и иницирование завершённым пробоем, применение «срезающего» разрядника (или любого другого способа ограничения длительности импульса) необязательно. С помощью опорной метки, формируемой в момент приложения к разряднику импульса напряжения, можно определить задержку детонации, а по осциллограммам тока и напряжения — энергию, выделившуюся в межэлектродном промежутке за это время. Условная хронограмма лидерного иницирования ЖВС показана на рис. 3, где ОМ — опорная метка, смещенная на известное время t_k , определяемое в калибровочных опытах с воздушным промежутком; t_0 — момент приложения к разряднику импульса напряжения, $t_{л}$ — продолжительность скрытой стадии — время от подачи напряжения на разрядник с ЖВС до появления свечения на электроде; $t_{дет}$ — задержка возбуждения детонации по отношению к моменту подачи напряжения; S — путь, пройденный лидером до момента возбуждения детонации; Щ — входная щель фоторегистратора; ТИС — развертка изображения точечного источника света.

Некоторые усредненные результаты экспериментов приведены в таблице, где для энергии W дана оценка сверху, для сопротивления разрядника R — оценка снизу.

С увеличением амплитуды напряжения на разряднике U (средней напряженности поля U/l) растет величина начального тока, однако сокращается продолжительность скрытой стадии $t_{л}$, повышаются стабильность зажигания разряда и скорость движения лидера, уменьшаются задержка возбуждения детонации $t_{дет}$ и величина энергии (с точностью до оценки), выделившейся в промежутке к моменту иницирования, после которого дальнейшее энерговыделение (от внешнего источника) уже не влияет ни на какие процессы. Перечисленные закономерности одинаковы для лидерного иницирования, т. е. иници-

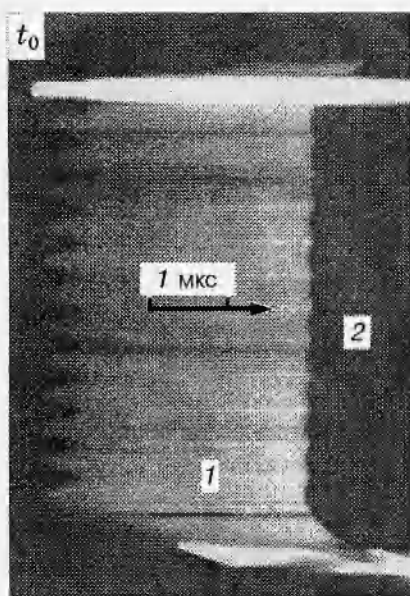


Рис. 4. Фотохронограмма эксперимента с лидерным инициированием ЖВС АК/ТНТ параллельно включенными искровыми разрядниками:

t_0 — момент подачи напряжения на разрядники, 1 — свечение фронта детонации, 2 — выход детонации на внутреннюю границу кюветы с ЖВС

рования незавершенным искровым разрядом, всех указанных выше ЖВС на основе АК. Поскольку сопротивление разрядника при лидерном инициировании до замыкания электродов фронтом детонации остается достаточно высоким (сотни Ом), можно реализовать (парадоксальную на первый взгляд) систему группового инициирования ЖВС, включая параллельно несколько разрядников без каких-либо дополнительных элементов. На рис. 4 приведена фотохронограмма одного из экспериментов с 12-ю разрядниками.

Зафиксированный факт инициирования ЖВС незавершенным искровым разрядом убедительно доказывает справедливость механизма электроискрового инициирования, предложенного в [4, 5]. В соответствии с [4, 5] электроны, ускоренные полем, теряют свою энергию в процессах ионизации, диссоциации и возбуждения атомов или молекул [10, 11]. Последние могут вступать в химическую реакцию друг с другом с дополнительным выделением энергии. Ускорение или затухание химической реакции (в соответствии с [12]) зависит от температуры и размеров «горячего очага». Скорость отбора энергии электронами определяется локальной напряженностью поля, следовательно, именно от локальной напряженности (с учетом размеров «горячего очага») зависит вероятность возникновения взрывного процесса. Поскольку напряженность поля максимальна в области «финального скачка», то очевидна преимущественность возникновения детонации именно здесь [5].

При повышении напряжения на разряднике задержка возбуждения детонации должна уменьшаться, что подтверждается в опытах. Кроме того, при повышении напряжения аналогичные условия могут быть созданы и ранее, до замыкания электродов проводящим каналом. Если скорость детонации ЖВС меньше скорости движения лидера (большие скорости замыкания, до сотен километров в секунду, наблюдаются у жидкостей с меньшей электрической проводимостью [9]), то возбуждение химической реакции в какой-либо области промежутка не влияет на дальнейшее развитие пробоя, и возможно инициирование детонации, например, в двух областях [4].

Таким образом, описанный ионизационный механизм электроискрового инициирования должен быть одинаков для ЖВС как с электролитическими, так и с диэлектрическими свойствами. Непосредственное выявление возможности лидерного инициирования (т. е. незавершенным разрядом) ЖВС с низкой проводимостью встречает известные технические трудности из-за высокой скорости движения лидеров ($> 0,1$ мм/нс), поскольку необходи-

ма синхронизация пробоя «срезающего» разрядника с точностью до десятых долей наносекунды. Однако, возможность такого инициирования доказывается в экспериментах с разрядниками с большим числом кромок на электродах, в результате чего разряд может одновременно зажигаться в нескольких точках. Пример такого эксперимента с раствором нитробензола в тетранитрометане приведен в [4] на рис. 2,з. На снимке наблюдаются три области, светящиеся в результате начальной ионизации. Яркая вспышка одной области соответствует пробое разрядника именно по этому каналу, детонация же возникла на канале, не достигшем второго электрода.

Следует предполагать, что по описанному механизму возможно инициирование детонации и при оптическом (лазерном) пробое высокочувствительных ЖВС.

ЛИТЕРАТУРА

1. Баум Ф. А. и др. Физика взрыва. М.: Наука, 1975.
2. Войцеховский Б. В., Топчиян М. Е. Исследование электрических свойств и чувствительности нитроглицерина к электрическому разряду // Динамика сплошной среды: Сб. науч. тр. / АН СССР. Сиб. отд-ние. Ин-т гидродинамики. 1971. Вып. 9. С. 116–126.
3. Боуден Ф., Иоффе А. Возбуждение и развитие взрыва в твердых и жидких веществах. М.: Изд-во иностр. лит., 1955.
4. Зотов Е. В., Козырев А. С., Бабадей С. М. и др. Инициирование детонации растворов нитробензола в тетранитрометане в канале электрического искрового разряда // Физика горения и взрыва. 1982. Т. 18, № 4. С. 110–114.
5. Зотов Е. В., Красовский Г. Б., Козырев А. С. О некоторых закономерностях электроискрового инициирования растворов нитросоединений в концентрированной азотной кислоте // Физика горения и взрыва. 1982. Т. 18, № 4. С. 107–110.
6. Дубовик А. С. Фотографическая регистрация быстропротекающих процессов. М.: Наука, 1975.
7. Мельников Н. П., Остроумов Г. А., Штейнберг А. А. Некоторые особенности электрического пробоя электролитов // Докл. АН СССР. 1962. Т. 147, № 4. С. 822.
8. Мельников Н. П., Остроумов Г. А., Стояк М. Ю. Развитие электрического разряда в водных электролитах // Докл. АН СССР. 1963. Т. 148, № 5. С. 1057.
9. Пробой диэлектриков и полупроводников: Сб. статей. М., Л.: Энергия, 1964.
10. Комельков В. С. Развитие импульсного разряда в жидкости // Журн. техн. физики. 1961. Т. 31, вып. 8. С. 948.
11. Адамчевский И. Электрическая проводимость жидких диэлектриков. Л.: Энергия, 1972.
12. Мержанов А. Г., Барзыкин В. В., Гонтковская В. Т. Задача об очаговом тепловом взрыве // Докл. АН СССР. 1963. Т. 148, № 2. С. 380–383.

Поступила в редакцию 5/V 1994 г.,
в окончательном варианте — 15/IV 1995 г.