

Рис. 2.

получены для разрядников типа острие — острие с $l = 0,2$ мм. Иницирующая способность разрядников слабо зависит от расстояния между электродами, заметно уменьшаясь только при малых l .

На рис. 2 показана зависимость $U_{пр}$ от l для раствора кислота — ДНБ 56/44 при использовании разрядников с электродной системой острие — острие. Аналогичный вид имеет зависимость минимальной энергии за-

жигания от l , полученная в экспериментах по зажиганию горючих газовых смесей электрической искрой [5]. Минимальное значение l , при котором начинается увеличение энергии, связано с критическим размером гашения. По аналогии можно предположить, что в случае иницирования взрыва жидких смесей искровым разрядом увеличение энергии иницирования должно происходить при межэлектродных расстояниях, сравнимых с критическим диаметром распространения детонации.

В связи с высокой электропроводностью жидких взрывчатых систем при приложении к разряднику импульса напряжения через разрядник протекает заметный ток. По этой причине процесс пробоя связан со значительными энергетическими затратами, причем они монотонно растут с увеличением содержания азотной кислоты в растворе, длины межэлектродного промежутка (при одном и том же пробивном напряжении) и пробивного напряжения, хотя в последнем случае время запаздывания пробоя падает. Так, например, для пробоя разрядника с $l = 0,2$ мм, заполненного составом кислота — ДНБ 60/40, при $U_{пр} = 11$ кВ должна быть затрачена энергия ~ 100 мДж. Эта энергия расходуется на газообразование в межэлектродном промежутке и процессы ионизации на всем пути движения «лидеров». Поскольку взрыв происходит только в одной, однозначно определенной области (в месте финального скачка «лидеров»), то отсюда следует, что затраченная энергия значительно превышает энергию, необходимую для возбуждения взрывной химической реакции. Напряжение же на разряднике отражает интенсивность ионизационных и других процессов на заключительной стадии пробоя жидких взрывчатых систем.

Поступила в редакцию 20/X 1980

ЛИТЕРАТУРА

1. Р. Х. Курбангалина. ЖПХ, 1959, 32, 7, 1467.
2. Н. П. Мельников, Г. А. Остроумов, М. Ю. Стояк. Докл. АН СССР, 1962, 147, 4, 822.
3. Н. П. Мельников, Г. А. Остроумов, М. Ю. Стояк. Докл. АН СССР, 1963, 148, 5, 1057.
4. Н. Б. Трофимов. — В сб.: Пробой диэлектриков и полупроводников. М.—Л.: Энергия, 1964.
5. Г. Эльбе. — В сб.: Вопросы горения и детонационных волн. М.: Оборонгиз, 1958.

ИНИЦИИРОВАНИЕ ДЕТОНАЦИИ РАСТВОРОВ НИТРОБЕНЗОЛА В ТЕТРАНИТРОМЕТАНЕ В КАНАЛЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ИСКРОВОГО ЗАРЯДА

Е. В. Зотов, А. С. Козырев, С. М. Бабадей,
Г. Б. Красовский, В. И. Дудин

(Москва)

Создание локальных очагов разогрева, приводящих к интенсивной химической реакции взрывчатых веществ, — необходимое условие любого способа иницирования. Иницирование электрическим разрядом интерес-

но тем, что искровой разряд характеризуется малыми размерами, которые могут быть сведены практически к точечным, быстрым выделением энергии и высокой ее плотностью. Длительность протекания тока может быть ограничена любой приемлемой величиной. В общем случае пробоя возбуждение детонации обеспечивается ударной волной и разогревом ВВ [1].

К настоящему времени инициирование жидких ВВ и смесей искровым разрядом изучено значительно меньше, чем газовых взрывчатых смесей и твердых ВВ (первичных и бризантных). В [2] упоминаются работы, в которых мощный разряд электрического конденсатора использовался для возбуждения взрыва при исследовании распространения детонации в тонких слоях нитроглицерина и растворов тетранитрометана с толуолом. В [3] рассматривалась чувствительность к электрическому разряду нитроглицерина. В условиях этих опытов инициирование зависело от объема жидкости и прочности сосуда, в котором размещался разрядник с жидким ВВ.

Цель настоящей работы — изучение основных закономерностей возбуждения взрыва при искровом пробое жидких ВВ. Для исследований были выбраны растворы нитробензола в тетранитрометане, характеризующиеся высокой чувствительностью к внешним воздействиям [4], молекулярной степенью однородности составов [5] и малым критическим диаметром распространения детонации [1].

Постановка эксперимента. Опыты проводились с разрядниками двух основных типов: с электрическим пробоем непосредственно через слой ВВ (электродная система острие — острие) и со скользящим разрядом по поверхности раздела между диэлектрической подложкой разрядника и ВВ. Длина межэлектродного промежутка l изменялась от 0,1 до 5 мм. К разряднику прикладывался импульс напряжения прямоугольной формы длительностью основной ступеньки не более 500 нс и амплитудой от 10 до 150 кВ. Напряжение на разряднике в момент пробоя регистрировалось с помощью скоростного осциллографа. Оптические явления при пробое и возбуждении детонации регистрировались фотохронографом на ЭОП типа ФЭР-1 в режиме щелевой развертки (при различной ориентации щели относительно изображения разрядника). Растворы готовились последовательным взвешиванием на аналитических весах нитробензола и готовой смеси. Взрывчатая смесь заливалась в разрядник непосредственно перед подрывом.

Результаты экспериментов. Первые же эксперименты показали три различных механизма, приводящих к взрыву при электрическом пробое исследованной системы. Во-первых, это возможность инициирования детонации непосредственно от границ канала разряда, во-вторых, возбуждение взрыва на стенках сосуда и опорах электродов и, наконец, зажигание следов ВВ в результате разрушения сборки с исследуемым веществом. В настоящей работе изложены только результаты, связанные с инициированием детонации непосредственно искровым разрядом и не зависящие от конфигурации, размеров и прочности сосуда с ВВ.

Полученные результаты свидетельствуют об инициировании ВВ в отдельных «горячих зонах». Распределение «горячих зон» по длине канала выявлено в экспериментах, когда щель фотохронографа располагалась вдоль оси, соединяющей электроды. На рис. 1 показана гистограмма частоты возбуждения детонации f в зависимости от относительного расстояния от положительного острия для системы тетранитрометан — нитробензол 60/40. Наиболее часто взрывная реакция начинается в одной области в середине межэлектродного промежутка. С ростом пробивного напряжения $U_{пр}$ (напряжения на разряднике в начальный момент пробоя до его спада) увеличивается вероятность развития детонации в двух различных областях канала (характерная фотохронограмма для разрядника с $l=1$ мм приведена на рис. 2, а). Скорость замыкания электродов проводящим каналом превышает при этом 200 км/с.

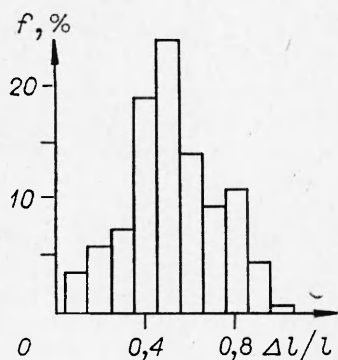


Рис. 1. Частота возбуждения детонации в зависимости от относительного расстояния от положительного острья.

Взаимно перпендикулярное расположение щели фотохронографа и оси канала позволяет выявить характер возбуждения детонации и распределение «горячих зон» по сечению канала. Рассмотрим качественную сторону явлений, проиллюстрированных рис. 2, б—з. При откате видно плавное увеличение сечения канала со временем практически с неизменной яркостью в течение 500 нс (см. рис. 2, б). Это время сопоставимо с длительностью протекания тока через разрядник. На некоторых кадрах удается рассмотреть низкоскоростной процесс, который, по-видимому, может быть идентифицирован как слабая ударная волна, расходящаяся от канала искры и вызванная быстрым нарастанием тока в момент замыкания электродов проводящим каналом. Скорость волны 1600—2000 м/с. Свечение волны вызвано преломлением света от канала искры на ее фронте.

Пробой разрядника при $U_{пр}$, соответствующем невысокой надежности инициирования, характеризуется заметной задержкой развития детонационного процесса в конденсированном слое жидкого ВВ (см. рис. 2, в), при увеличении пробивного напряжения задержка уменьшается. Для растворов, близких к стехиометрическому, она может быть менее 50 нс. В основном детонация распространяется симметрично от оси светящейся области, при этом не наблюдаются изгибы детонационного фронта, вызванные, например, ускорением химической реакции. Этот же факт говорит о том, что размеры парогазовой полости, которая возникает обычно при пробое жидкостей с высокой проводимостью [6], по крайней мере не превышают размеров светящейся области. Не удается увидеть тонкую структуру канала, который может иметь боковые ветви. Однако при пониженных напряжениях пробоя возможно возбуждение взрыва в периферийных областях канала, что подтверждается резкой асимметрией точки пересечения линий детонационного фронта по отношению к оси светящейся области (см. рис. 2, г). В некоторых опытах видна очень сложная линия отсечки свечения канала искры детонационным фронтом, что может свидетельствовать о существовании нескольких очень близко расположенных ветвей или каналов (см. рис. 2, д).

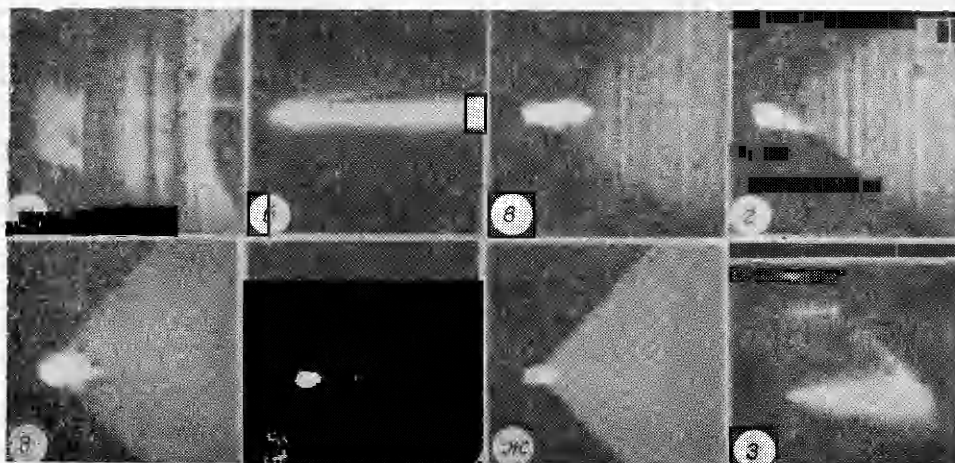


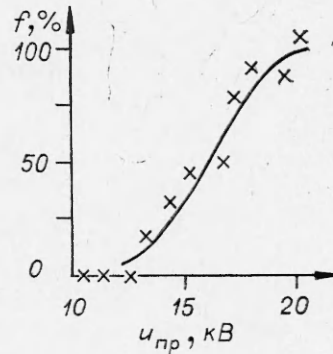
Рис. 2. Характерные фотохронограммы пробоя и развития детонации ($T_m = 20$ нс).
112

Рис. 3. Зависимость частоты взрывов от напряжения на разряднике в момент пробоя.

Полученные результаты позволяют сделать вывод о слабом влиянии величины энергии, выделившейся в канале разряда после пробоя, на развитие детонационного процесса. Проведено несколько серий опытов, в которых изменялась величина накопительной емкости, включенной последовательно с разрядником. При завершеном пробое максимальная энергия не могла превысить сумму энергии, «запасенной» в межэлектродной емкости разрядника $C_p \sim 1 \cdot 10^{-12}$ Ф и «запасаемой» после пробоя в накопительной емкости $C_n = (2,5 \div 1000) \cdot 10^{-12}$ Ф. В каждой серии построены зависимости частоты взрывов от напряжения пробоя. Получено совпадение этих зависимостей с точностью до ошибки эксперимента. Для системы тринитрометан — нитробензол 63/37 в случае $l = 0,2$ мм 50% взрывов происходит при пробивном напряжении ~ 24 кВ. Длительность свечения искрового канала при отказе для $C_n = (2,5 \div 6) \cdot 10^{-12}$ Ф не превышает 70—100 нс (см. рис. 2, е). Поскольку сопротивление разрядника при пробое через 1,5—3 нс уменьшается до десятков ом, следовательно, это вообще максимальное время, в течение которого через разрядник может протекать ток. Характер возбуждения детонации при этом не изменился (см. рис. 2, ж).

Эксперименты показывают, что для определенного вида разрядников и для определенного состава системы вероятность взрыва зависит только от величины пробивного напряжения. Связь между f и $U_{пр}$ подчиняется нормальному закону. На рис. 3 приведены экспериментальные значения f для разных $U_{пр}$ и график нормальной интегральной функции, полученные для системы с соотношением компонентов 76/24 при использовании разрядников с $l = 0,2$ мм; 50%-ной частоте взрывов соответствует $U_{пр} = 16$ кВ. Таким образом, пробивное напряжение есть параметр, определяющий вероятность взрыва при электрическом искровом пробое растворов нитробензола в тетранитрометане. Этот параметр удобен тем, что достаточно легко поддается регулировке и измерению. Кроме того, амплитуда импульса (при прямоугольной ступеньке напряжения) характеризует и вероятность самого пробоя. Напряжение, при котором $f = 50\%$, может быть принято за меру чувствительности жидкого ВВ к электрическому разряду. В рассмотренном интервале $l = 0,1 \div 5$ мм нигде не выполняется условие $U_{пр}/l = \text{const}$, что объясняется неравномерным распределением «горячих зон» по длине канала.

Выбор напряжения на разряднике в качестве критерия, обуславливающего надежность инициирования, находит следующее физическое объяснение. После зажигания разряда, например на аноде, лидер начинает распространяться в сторону другого электрода. Канал лидера имеет достаточно высокую проводимость, т. е. его головка имеет практически потенциал анода, в результате чего у его головки также сосредоточиваются высокие поля [7]. Энергия электрического поля, отбираемая электронами, затрачивается на процессы ионизации, диссоциации, возбуждения колебаний вдоль химических связей, на вращение отдельных групп и на вибрации цепочек молекул и т. д. [8]. Скорость отбора энергии определяется локальной напряженностью поля, которая максимальна в принципе в районе финального скачка лидеров до замыкания электродов проводящим каналом; после замыкания напряжение на разряднике (и напряженность) резко падает, уменьшается и скорость отбора энергии. Отсюда объяснимо возникновение детонации в середине межэлектродного промежутка, а разброс по длине канала вызван статистическим разбросом во времени зажигания разряда на разных электродах.



Для иллюстрации сказанного на рис. 2, 3 показан снимок процесса возбуждения детонации скользящим разрядом. В опыте искровой промежуток образован острыми кромками по длине, превышающей l . Поэтому высока вероятность зажигания разряда сразу на нескольких острых кромках. На приведенном снимке видны три светящиеся области. Яркая вспышка внизу показывает, что разряд произошел именно по этому каналу, однако детонация возникла в верхней области.

Таким образом, согласно предложенному механизму, развитие химических реакций происходит уже в процессе формирования искрового разряда в жидкой взрывчатой системе. Малые задержки инициирования вызваны тем, что размеры «горячих зон» сопоставимы с величиной критического диаметра распространения детонации.

Поступила в редакцию 20/X 1980

ЛИТЕРАТУРА

1. Ф. А. Баум и др. Физика взрыва. М.: Наука, 1975.
2. Ф. Боуден, А. Иоффе. Возбуждение и развитие взрыва в твердых и жидких веществах. М.: ИЛ, 1955.
3. Б. В. Войцеховский, М. Е. Толчий. — В сб. Динамика сплошной среды. Вып. IX. Новосибирск, 1971.
4. Е. Ю. Орлова. Химия и технология бризантных взрывчатых веществ. Л.: Химия, 1973.
5. А. Штетбахер. Пороха и взрывчатые вещества. М., 1936.
6. А. И. Алхимов и др. Докл. АН СССР, 1970, 194, 5.
7. В. С. Комельков. ЖТФ, 1961, 31, 8.
8. И. Адамчевский. Электрическая проводимость жидких диэлектриков. Л.: Энергия, 1972.

О СОПРОТИВЛЕНИИ ТЕЛ В ПОТОКЕ ДЕТОНИРУЮЩЕГО ГАЗА

М. М. Гилинский, Т. С. Новикова

(Москва)

Известно, что подвод тепла в сверхзвуковой поток сопровождается возрастанием давления, а дозвуковой — падением. В ряде экспериментов [1, 2] отмечается заметное снижение (до ~ 50%) сопротивления затупленных тел (сферы и цилиндрического торца) при подводе тепла за счет гомогенного горения вблизи передней критической точки тела. Оценки влияния теплоподвода на аэродинамические характеристики тел сделаны в [3—5]. Автор работы [5], используя в гиперзвуковом приближении решение с постоянной плотностью за бесконечно тонкой отошедшей детонационной волной, получил для тел с круговой образующей снижение сопротивления, близкое к экспериментально наблюдаемому: для сферы ~ 40%, цилиндра ~ 36%.

Цель настоящей работы — показать, что допущения в [5] сильные и оценки снижения волнового сопротивления существенно завышены. Для объяснения экспериментального факта следует искать другие причины: влияние вязких и нестационарных эффектов, турбулизации потока, изменения донного давления и другие.

Проанализируем влияние теплоподвода на величину давления торможения за прямым скачком детонации. Используя соотношения Рэнкина — Гюгопио на детонационной поляре и формулы изэнтропического сжатия за волной, получаем для отношения давления торможения за волной детонации p_{01} и обычной ударной волной p_0 следующую формулу:

$$\chi(M_\infty, \gamma_\infty, \gamma, F) = \frac{p_{01}}{p_0} \frac{\left(1 + \frac{\gamma-1}{2} M_{s1}^2\right)^{\gamma/(\gamma-1)}}{\left(1 + \frac{\gamma_\infty-1}{2} M_s^2\right)^{\gamma_\infty/(\gamma_\infty-1)}} \cdot \frac{1 + \frac{\gamma_\infty}{\gamma+1} \left(M_\infty^2 - \frac{\gamma}{\gamma_\infty}\right) F}{1 + \frac{2\gamma_\infty}{\gamma_\infty+1} (M_\infty^2 - 1)}, \quad (1)$$