

ВВ с $h = 10^{-3}$ м, заполнявший все поперечное сечение ударной трубы, устанавливался в плоскости открытого торца. Калорийность ВВ соответствовала принятой в расчетах. Заряд инициировался в одной точке в центре или в 12 точках, равномерно распределенных по плоскому его основанию.

Зависимости избыточного давления от времени измерялись индуктивными датчиками давления в точках $x = 2,78$ и $5,28$ м (см. рис. 6, а, б соответственно). Контактными датчиками, расположенными с базой $\Delta x = 0,2$ м, находилась траектория движения фронта УВ. Погрешности определения зависимостей $\Delta p(t)$ и $\Delta p_\phi(x)$ не превосходили 10 и 3% соответственно. Сопоставление результатов экспериментов с расчетными данными на рис. 5 и 6 указывает на достоверность последних. Пульсации на экспериментальных кривых на рис. 6 объясняются собственными колебаниями стенки ударной трубы с периодом $T \approx 2\pi R/c_{г.} \approx 0,33$ мс.

Таким образом, результаты двумерных расчетов по изучению процесса формирования УВ в трубе при подрыве плоского заряда, подтвержденные экспериментом, позволили определить количество точек инициирования для обеспечения требуемого уровня однородности потока на заданном расстоянии от заряда и показать, что возмущения параметров потока, выявленные на стенке трубы, в 2—3 раза меньше максимально возможных по сечению ударной трубы.

Поступила в редакцию 15/IX 1981

ЛИТЕРАТУРА

1. Дафф, Блэкуэл. Прикладная механика, 1966, 37, 5.
2. Э. Э. Лин, А. В. Сиренко, А. Н. Фунтиков. ФГВ, 1979, 15, 2.
3. Э. Э. Лин, А. В. Сиренко. ФГВ, 1979, 15, 5.
4. Т. В. Баженова, Л. Г. Гвоздева. Нестационарные взаимодействия ударных волн. М.: Наука, 1977.
5. Численное решение многомерных задач газовой динамики/Под ред. С. К. Годунова. М.: Наука, 1976.
6. А. С. Фонарев, С. Ю. Чернявский. Изв. АН СССР, МЖГ, 1968, 5.
7. Э. Э. Лин, А. В. Сиренко, А. И. Фунтиков. ФГВ, 1980, 16, 4.
8. Ф. А. Баум и др. Физика взрыва. М.: Наука, 1975.
9. П. П. Орнатский. Автоматические измерения и приборы. Киев: Вища школа, 1971.

О НЕКОТОРЫХ ЗАКОНОМЕРНОСТЯХ ЭЛЕКТРОИСКРОВОГО ИНИЦИИРОВАНИЯ РАСТВОРОВ НИТРОСОЕДИНЕНИЙ В КОНЦЕНТРИРОВАННОЙ АЗОТНОЙ КИСЛОТЕ

Е. В. Зотов, Г. Б. Красовский, А. С. Козырев

(Москва)

Электроискровое инициирование жидких взрывчатых веществ (ЖВВ) — по существу новая область в исследовании свойств ВВ, так как систематическое изучение процессов, происходящих при пробое ЖВВ и последующем возбуждении детонации, ранее практически не проводилось. В известных работах детонация ВВ возбуждается под действием мощной ударной волны, возникающей при электрическом низковольтном разряде энергоемкого накопителя. Благодаря прозрачности взрывчатых растворов удается достаточно подробно изучить последовательные процессы пробоя и инициирования взрыва и установить при этом ряд закономерностей.

Наибольший интерес представляет исследование ЖВВ или смесей, имеющих малый критический диаметр распространения детонации $d_{кр}$, так как это дает предпосылки к получению малых задержек иницииро-

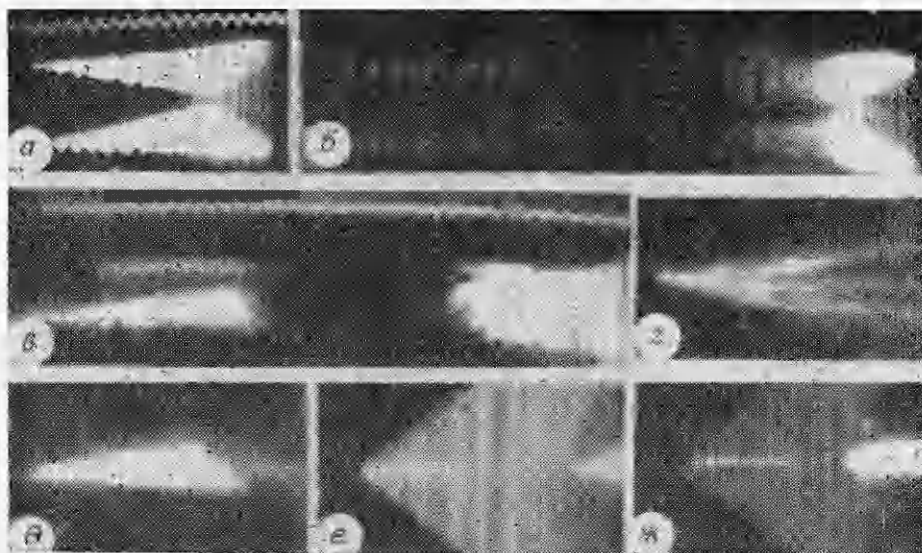


Рис. 1.

вания, поскольку при пробое создается «горячий очаг», по размерам сравнимый с $d_{кр}$. В настоящей работе проведено экспериментальное исследование электроискрового инициирования при пробое ряда растворов нитросоединений (нитробензола — НБ, динитробензола — ДНБ, тринитробензола — ТНБ и тринитротолуола — ТНТ) в высококонцентрированной азотной кислоте (97—99%). Известно, что для раствора нитробензола в азотной кислоте $d_{кр} < 0,5$ мм [1].

В работе использовались электродные системы острие — острие и острие — плоскость. Расстояние между электродами $l = 0,1 \div 0,5$ мм. К разряднику прикладывался импульс напряжения прямоугольной формы с длительностью основной ступеньки 200 нс и амплитудой 5—70 кВ. В каждом опыте регистрировались напряжение на разряднике и ток, протекающий через разрядник. Оптические явления регистрировались на фотохронографе с ЭОП типа ФЭР-1 в режиме щелевой развертки.

Азотная кислота, ее водные растворы, а также растворы органических соединений в ней имеют высокую электропроводность. Удельная электропроводность кислоты с массовой концентрацией 95—100% изменяется от $\gamma \approx 2,5$ до $\gamma \approx 5$ Ом⁻¹ · м⁻¹, имея минимальное значение (1,5 Ом⁻¹ · м⁻¹) при 97,5%-ной концентрации; при изменении содержания кислоты в растворе, например, за счет увеличения ТНТ от 50 до 70%, γ изменяется от $5 \cdot 10^{-2}$ до 1 Ом⁻¹ · м⁻¹. Согласно проведенным ранее исследованиям, поведение многих растворов при высокой напряженности электрического поля существенно зависит от их низковольтной удельной электропроводности [2, 3]. В процессе развития пробоя обычно выделяют три стадии: скрытую — от момента приложения напряжения к разряднику до появления видимого свечения на электродах; стадию формирования и прорастания «лидера» в сторону противоположного электрода; стадию развития канала искры (см., например, [4]).

Все три стадии четко фиксируются и при пробое растворов нитросоединений в азотной кислоте. На рис. 1, а — в приведены характерные фотохронограммы для раствора ДНБ — азотная кислота 44/56, полученные при расположении щели хронографа вдоль оси электродов. Продолжительность скрытой стадии определяется с помощью опорной метки, формируемой в момент приложения импульса напряжения к разряднику (в экспериментах она сдвигалась по времени для исключения искажений изображения на фотохронограмме, на рис. 1 не показана). В электрод-

ной системе острие — острие «лидера» образуется практически одновременно на обоих остриях, а в системе острие — плоскость только на острие. Скорость движения «лидера», зависящая от электропроводности раствора и от величины напряжения на разряднике, постоянна, и только при подходе «лидера» к противоположному электроду и при встрече «лидеров» в области финального скачка она заметно увеличивается. В момент замыкания электродов проводящим каналом он ярко вспыхивает по всей длине. При этом детонация возникает только в районе финального скачка, т. е. в месте встречи «лидеров» в середине межэлектродного промежутка для электродов системы острие — острие (см. рис. 1, а) и у плоскости для электродов острие — плоскость.

Любопытны опыты, в которых два импульса напряжения подавались на разрядник с паузой между ними ~ 300 нс (см. рис. 1, б, в). Если длительности первого импульса недостаточно для завершения пробоя, то после спада напряжения свечение канала прекращается, возобновляясь по всей длине, ранее пройденной «лидером» («лидерами»), после подачи второго импульса напряжения. При этом движение «лидеров» продолжается с точки остановки, дальнейшая картина развития пробоя не нарушается. Завершение разряда может сопровождаться инициированием детонации в растворе.

Вероятность взрыва для фиксированного значения межэлектродного расстояния и состава раствора зависит только от напряжения на разряднике в момент пробоя (пробивного напряжения) $U_{пр}$. Эта зависимость подчиняется нормальному закону. Значение $U_{пр}$, соответствующее 50% взрывов, в дальнейшем принимаем за меру чувствительности смеси к искровому разряду. Повышение $U_{пр}$ свидетельствует о понижении чувствительности.

Пробой коротких промежутков при низких напряжениях, при которых велика вероятность отказов взрывов, происходит в газовых пузырях, что видно по искажениям свечения искрового канала и детонационного фронта на фотохронограммах, полученных при взаимно перпендикулярном расположении щели хронографа и оси, соединяющей электроды (см. рис. 1, г). При повышении $U_{пр}$ искажения такого рода исчезают, однако при этом наблюдаются случаи асимметричного возникновения детонации, когда детонация возбуждается в небольшой области, примыкающей к искровому каналу (см. рис. 1, д).

При очень высоких пробивных напряжениях детонация возникает сразу после пробоя, симметрично распространяясь в объеме смеси. Если задержку детонации определять как время от момента вспышки канала до точки пересечения детонационных фронтов на хронограммах, то она при этом может быть равна нулю (см. рис. 1, е).

При пробое длинных промежутков, особенно промежутков, образованных электродной системой острие — плоскость, иногда наблюдается появление параллельных «лидеров» с различной интенсивностью свечения. Из-за сравнительно малой скорости движения «лидеров» пробой осуществляется только по одному каналу, шунтирующему все остальные, поэтому детонация возникает только на одном канале (см. рис. 1, ж).

Максимальную чувствительность имеют растворы, по составу близкие к стехиометрическим. Так, для растворов ДНБ в азотной кислоте с концентрацией $\sim 98\%$ получено (при использовании разрядников типа острие — острие с длиной межэлектродного промежутка $l = 0,2$ мм) $U_{пр} = 14, 11$ и 16 кВ при концентрации ДНБ 44, 40 и 36% соответственно. С увеличением числа нитрогрупп в бензольном кольце чувствительность к искровому разряду растворов рассмотренных нитросоединений в азотной кислоте, близких к стехиометрическим, падает: для раствора кислота — НБ 71/29 $U_{пр} = 11$ кВ (69/31 — 12 кВ), кислота — ДНБ 60/40 $U_{пр} = 11$ кВ, кислота — ТНБ 47/53 $U_{пр} \approx 23$ кВ. Последний состав имеет практически одинаковую чувствительность с раствором кислота — ТНТ 53,8/46,2, для которого $U_{пр} = 25$ кВ. Эти данные также

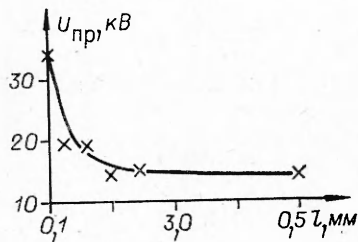


Рис. 2.

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-