

## ЛИТЕРАТУРА

1. В. А. Одинцов, Л. А. Чудов.— В сб.: Проблемы динамики упругопластических сред. № 5. М., Мир, 1975.
2. В. А. Одинцов, В. В. Селиванов, Л. А. Чудов. Изв. АН СССР, МТТ, 1974, 3.
3. В. А. Одинцов, В. В. Селиванов, Л. А. Чудов. Изв. АН СССР, МТТ, 1975, 5.
4. Ф. А. Баум, Л. П. Орленко и др. Физика взрыва. М., Наука, 1975.
5. В. М. Кузнецов. ФГВ, 1973, 9, 4.
6. В. А. Одинцов, В. В. Селиванов, Л. А. Чудов. ПМТФ, 1974, 2.
7. Э. А. Кошелев.— В сб.: Динамика сплошной среды. Вып. 13. Новосибирск, 1973.
8. Н. Л. Ослон, Л. В. Кохман и др. Сталь, 1964, 6.
9. Ю. И. Фадеевко. ПМТФ, 1977, 6.
10. Ю. И. Фадеевко.— В сб.: Динамика сплошной среды. Вып. 32. Новосибирск, 1977.
11. А. Г. Черников. ФГВ, 1976, 12, 4.
12. А. Г. Иванов, Л. И. Кочкин и др. ФГВ, 1974, 10, 1.
13. А. Г. Иванов, В. Н. Мипаев и др. ФГВ, 1974, 10, 4.
14. Э. А. Кошелев, В. М. Кузнецов и др. ПМТФ, 1971, 2.
15. В. М. Кузнецов. ПМТФ, 1968, 2.

## ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ ПРОДУКТОВ ДЕТОНАЦИИ ТЕТРАНИТРОМЕТАНА

*А. Г. Антипенко, А. Н. Дремин, В. В. Якушев*

*(Черноголовка)*

Проведенные ранее исследования показали, что электропроводность продуктов детонации обычных ВВ состава С, N, H, O обусловлена главным образом диссоциацией воды на ионы в условиях высоких давлений и температуры [1—3]. В связи с этим большой интерес представляет изучение проводимости продуктов детонации ВВ, не содержащих водород. Если она и возникает, то не может быть связана с диссоциацией воды, а определяется другими процессами.

В настоящей работе в качестве такого ВВ выбран тетранитрометан  $C(NO_2)_4$ . Перед опытами вещество очищалось отмыванием водой и последующим многократным вымораживанием. Показатель преломления очищенного тетранитрометана оказался равным  $n_D^{20} = 1,4384$ , что совпадает с табличным значением [4].

Использовалось экспериментальное устройство (рис. 1), где тетранитрометан находился в стеклянном цилиндрическом сосуде диаметром 40 и длиной 150 мм. Детонация инициировалась с помощью генератора плоской ударной волны. В опыте измерялось сопротивление между коаксиальными электродами, выполненными из нержавеющей стали, с помощью импульсной установки, описанной в [5].

Типичная осциллограмма показана на рис. 2. Начальный участок соответствует сопротивлению между электродами в исходном тетранитрометане, которое можно считать бесконечно большим. В любой момент времени сопротивление легко рассчитать по формуле

$$R = R_0 / (V_\infty / V - 1), \quad (1)$$

где  $V$  — текущее напряжение на входном сопротивлении осциллографа;  $V_\infty$  — напряжение, соответствующее  $R = \infty$ . Величина  $R_0$  определяется резисторами в измерительной цепи. Из осциллограммы видно, что в момент касания детонационным фронтом торца электродов сопротивление между ними падает до  $R_1 = 6$  Ом и в дальнейшем остается почти посто-

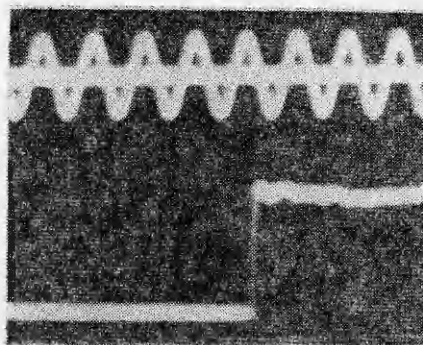
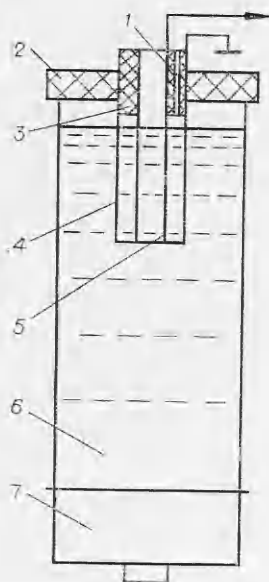


Рис. 2. Осциллограмма электропроводности продуктов детонации тетранитрометана; частота меток времени 1 МГц,  $R_0 = 6,32 \text{ Ом}$ .

Рис. 1. Экспериментальное устройство.

1 — отверстие,  $d=1 \text{ мм}$ ; 2 — перекладина из оргстекла; 3 — тефлоновая прокладка; 4 — цилиндрический электрод,  $d=12 \times 0,2 \text{ мм}$ ; 5 — цилиндрический электрод,  $d=6 \times 0,4 \text{ мм}$ ; 6 — тетранитрометан; 7 — генератор плоской ударной волны.

янным. Такой характер сигнала говорит о том, что максимальная проводимость за фронтом сосредоточена в узкой (не более 1 мм) зоне. Следовательно, стационарную детонационную волну в тетранитрометане можно охарактеризовать поверхностным сопротивлением, имеющим смысл удельного сопротивления, деленного на эффективную ширину проводящей зоны:

$$\rho_n = 2\pi R_1 / \ln(r_2/r_1) = 60 \text{ Ом}, \quad (2)$$

где  $r_1$  и  $r_2$  — соответственно внутренний и внешний радиус слоя ВВ между электродами.

Возникает существенный для выяснения механизма изучаемого явления вопрос, локализована ли проводимость лишь в зоне химической реакции или она имеется также и в области конечных продуктов детонации. Для ответа на этот вопрос предпринята попытка исследовать распределение проводимости за детонационным фронтом в зарядах различного диаметра, так как известно, что с увеличением диаметра длительность химпика практически не меняется, а зона высокого давления растет пропорционально диаметру [6].

В экспериментах использовано устройство, описанное в [2]. С помощью электродов-проволочек измерялась электропроводность в центре цилиндрического заряда ВВ на границе с тефлоновой пластиной, которая препятствовала торцевому разлету (регистрируемый сигнал имеет вид первого импульса на рис. 4). В некоторый момент времени детонационная волна касается электродов, затем в момент  $t_0$  выходит на границу ВВ с тефлоном. Сопротивление между электродами при этом достигает значения  $R_{\min}$  и начинает расти.

Обычно в таких экспериментах можно найти удельную электропроводность путем электролитического моделирования. Однако в данном случае ширина проводящей зоны очень мала, поэтому для максимальной проводимости удается сделать лишь оценку снизу  $\sigma_{\max} \geq 10 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$ . Эта величина близка к проводимости продуктов детонации обычных ВВ. На рис. 3 приведены результаты опытов в виде усредненных зависимостей величины  $\lg R/R_{\min}$  от времени для зарядов диаметром 40 (1) и 80 мм (2). Здесь  $R$  — текущее сопротивление, время отсчитывается от

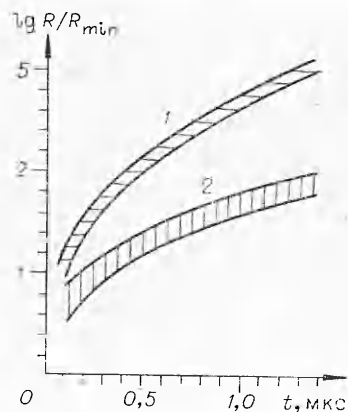


Рис. 3. Зависимость  $\lg(R/R_{\min})$  от времени для тетранитрометана.

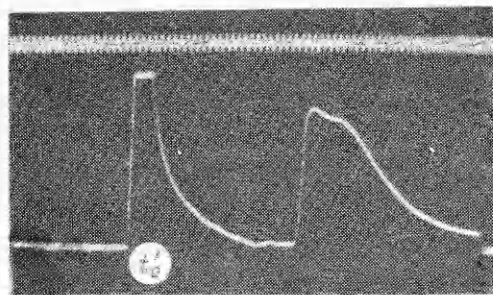


Рис. 4. Осциллограмма электропроводности продуктов детонации тетранитрометана при повторном сжатии; диаметр заряда 80 мм; частота меток времени 10 мГц,  $R_0=220$  Ом.

момента  $t_0$ . Хотя сопротивление резко меняется в обоих случаях, все же в зарядах большого диаметра оно растет медленнее.

В отдельных опытах тефлоновая прокладка толщиной 5 мм отделяла ВВ от медного блока аналогично [3]. При этом в частично разгрузившиеся продукты детонации входила отраженная от меди ударная волна. Как видно из осциллограммы (рис. 4), электропроводность продуктов при повторном сжатии вновь возрастает за счет увеличения давления и температуры, хотя реакция взрывчатого превращения давно завершена. Указанные результаты говорят о том, что конечные продукты детонации тетранитрометана обладают равновесной проводимостью.

Согласно [7], длительность химпика при детонации тетранитрометана составляет 0,5 мкс. Можно было ожидать, что зависимость электропроводности от времени за детонационным фронтом при  $t < 0,5$  мкс будет одинаковой для разных диаметров заряда. Однако, как видно из рис. 3, кривые, соответствующие диаметрам 40 и 80 мм, расходятся менее чем за 0,1 мкс. Каких-либо особенностей при  $t \approx 0,5$  мкс кривые не имеют. Эти данные указывают на то, что длительность химпика не превышает 0,1 мкс, т. е. значительно меньше значения, указанного в [7]. Такое расхождение побудило провести дополнительные опыты с целью определения длительности химпика.

На рис. 5 показана осциллограмма массовой скорости, полученная с помощью электромагнитной методики [6]. Электромагнитный датчик выполнен из алюминиевой фольги толщиной 0,015 и шириной 3 мм. Длина перекладки составляла 5 мм. Давление в точке перегиба, соответствующее плоскости Чепмена — Жуге, оказалось равным 17 ГПа. Зафиксированная область повышенной массовой скорости по времени составляет около 0,1 мкс, что соответствует возможной одновременности выхода детонационной волны на датчик. Следует заключить, что длительность химпика, во всяком случае, не превосходит 0,1 мкс.

Проведены также эксперименты по регистрации профиля давления при детонации тетранитрометана с помощью манганиновых датчиков [8]. Чувствительный элемент датчика имел зигзагообразную форму и занимал площадь  $7 \times 7$  мм. Он помещался на границу тефлонового блока с ВВ и отделялся от последнего тефлоновой пленкой толщиной 0,2 мм. Зазор между пленкой и блоком заполнялся вакуумной смазкой. Опыты показали, что данной методикой химпик не разрешается и, следовательно, его длительность не превышает 0,1 мкс. Интересно, что величина максимального давления в тефлоне равна 17 ГПа, т. е. совпадает с дав-

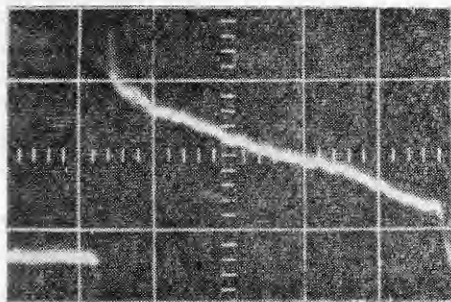


Рис. 5. Оциллограмма массовой скорости; диаметр заряда 40 мм; напряженность магнитного поля  $2,7 \cdot 10^4$  А/м; чувствительность 0,11 В/дел; масштаб времени 0,5 мкс/дел.

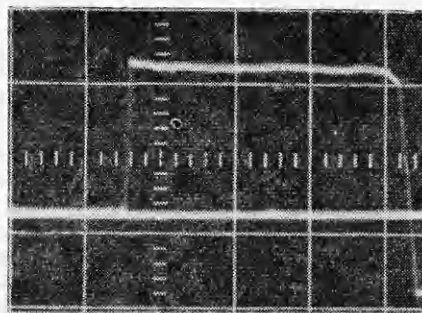
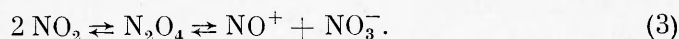


Рис. 6. Электрохимический сигнал при детонации тетранитрометана; электроды: медь — цинк; заземлен цинковый электрод; чувствительность 0,63 В/дел; масштаб времени 2 мкс/дел.

лением в плоскости Чепмена — Жуге при детонации тетранитрометана. Это указывает на то, что ударные адиабаты тефлона и продуктов детонации тетранитрометана близки между собой. Таким образом, проведенные эксперименты по регистрации профилей электропроводности, массовой скорости и давления показали, что длительность химика в тетранитрометане не менее чем в 5 раз меньше значения, указанного в [7]. Причины этого расхождения не ясны.

Для выяснения природы электропроводности продуктов детонации проведены опыты по фиксации электрохимических потенциалов (см. [1, 9]). Схема экспериментов аналогична описанной в [10]. Исследуемое ВВ находилось в стеклянном сосуде высотой 150 и диаметром 40 мм. Параллельно оси заряда в тетранитрометане помещались два электрода из разных металлов, представляющие собой плоскопараллельные пластины толщиной 0,1, шириной 10 и длиной 50 мм. Расстояние между плоскостями электродов составляло 2—3 мм. Когда распространяющаяся по ВВ детонационная волна достигала системы электродов, между ними возникала разность потенциалов. Абсолютное сопротивление продуктов между электродами составляло  $\sim 20$  Ом, поэтому на сборке для фиксации электрохимической ЭДС последовательно с входным сопротивлением осциллографа (75 Ом) устанавливался резистор величиной  $\sim 600$  Ом, обеспечивающий сопротивление нагрузки, значительно превосходящее внутреннее сопротивление источника сигнала. На рис. 6 приведена оциллограмма электрохимической ЭДС. Ее величина постоянна во времени в отличие от ЭДС, наблюдающейся при детонации нитрометана [10]. Оказалось, что для пары электродов медь — алюминий ЭДС равна 2,2 В, а для пары медь — цинк — 1,3 В. В обоих случаях медный электрод положителен. Величина и знак сигналов указывают на то, что электропроводность имеет ионную природу.

Тетранитрометан — ВВ с большим положительным кислородным балансом. Его продукты детонации могут содержать значительное количество двуокиси азота. Поэтому источником ионов может быть реакция



Этот процесс в незначительной степени протекает и в нормальных условиях [11]. Можно предположить, что с повышением давления равновесие сместится в сторону образования ионов, как это происходит в случае воды [12].

Для проверки этой гипотезы проведены опыты по измерению электропроводности жидкой  $\text{NO}_2$  при ударном сжатии. Двуокись азота получали нагреванием нитрата свинца и сушили над пятиокисью фос-

фора. Ударная волна создавалась зарядом ВВ (октоген, плотностью  $1,81 \text{ г/см}^3$ ) размером  $80 \times 120 \text{ мм}$ . Исследуемая  $\text{NO}_2$  находилась в тефлоновой ячейке. Для поддержания начальной температуры, близкой к нулю, использовали охлаждающую смесь (вода со льдом). В качестве измерительных электродов применяли платиновые проволочки диаметром  $0,25 \text{ мм}$ , расположенные перпендикулярно плоскости ударного фронта. Расстояние между электродами  $5 \text{ мм}$ . Переход от измеряемого в опыте сопротивления к проводимости осуществляли путем электролитического моделирования. По результатам трех опытов установлено, что при давлении ударной волны в тефлоне  $29 \text{ ГПа}$  проводимость  $\text{NO}_2$  составляет  $60 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$ . Таким образом, двуокись азота может вызвать электропроводность продуктов детонации тетранитрометана.

Поступила в редакцию  
21/VIII 1979

#### ЛИТЕРАТУРА

1. В. В. Якушев, А. Н. Дремин. Докл. АН СССР, 1975, 221, 5.
2. А. Г. Антипенко, А. Н. Дремин, В. В. Якушев. Докл. АН СССР, 1975, 225, 5.
3. А. Г. Антипенко, В. В. Якушев. — В сб.: Химическая физика процессов горения и взрыва. Детонация. Черноголовка, ОИХФ АН СССР, 1977.
4. Л. И. Хмельницкий. Справочник по взрывчатым веществам. Ч. II. М., Военная Артиллерийская инженерная академия им. Ф. Э. Дзержинского, 1961.
5. В. В. Якушев, С. С. Пабаатов, О. Б. Якушева. ФГВ, 1974, 10, 4.
6. А. Н. Дремин, С. Д. Савров и др. Детонационные волны в конденсированных средах. М., Наука, 1970.
7. А. Н. Дремин, С. Д. Савров. ФГВ, 1966, 2, 1.
8. Г. И. Канель. Применение манганиновых датчиков для измерения давления ударного сжатия конденсированных сред. ВИНТИ, отд. научн. фондов, № 477—74, Деп. от. 28.02.74.
9. В. В. Якушев, А. Н. Дремин. ЖФХ, 1971, 45, 1.
10. A. N. Drem in, V. V. Yakushev. Acta Astronautica, 1974, 1, 7/8.
11. Г. Реми. Курс неорганической химии. М., Мир, 1972.
12. S. D. Hamann, M. Linton. Trans. Faraday Soc., 1966, 62, 2234.

### ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СЕГНЕТОЭЛЕКТРИКОВ В УСЛОВИЯХ УДАРНО-ВОЛНОВОГО НАГРУЖЕНИЯ. II. ФИЗИЧЕСКИЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ

*Е. З. Новицкий, В. Д. Садунов, Т. В. Трищенко*  
(Москва)

В [1] подробно рассмотрены методы вольтметра — амперметра и колебательного контура применительно к измерению электрофизических параметров сегнетоэлектриков, в частности пьезо-, сегнетоэлектрической керамики (ПК). Рассматривались случаи, когда образец ПК подвергался воздействию только ударной волны (УВ), только быстропеременного электрического поля (Е), комплекса УВ и Е. Все эти случаи реализуются во взрывных преобразователях энергии на основе ПК [2], для которых характерно, что ПК разбивается фронтом УВ на две зоны — сжатого и несжатого вещества.

Ниже излагаются первые результаты исследований ПК марок<sup>1</sup> ЦТС-19 и ПКР-1 в несжатой и сжатой зонах по методу вольтметра —

<sup>1</sup> Свойства ЦТС-19 и ПКР-1 см. в [1, 2]. Значения коэрцитивных полей ПК:  $1,2 \div 1,6$  и  $0,6 \div 1,2 \text{ кВ/мм}$  соответственно.