



которого достигает 1200 кг/мм^2 . Подбирая соответствующие параметры плазмы, можно добиться различных структурных превращений в стенке, что может быть важно при практическом использовании данного воздействия.

Автор выражает свою признательность А. А. Дерibasу и А. Е. Войтенко за обсуждение результатов работы.

Поступила в редакцию
16/XI 1977

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Е. Войтенко. Докл. АН СССР, 1964, 158, 6.
2. А. Е. Войтенко. ПМТФ, 1966, 112, 4.
3. А. Е. Войтенко, В. И. Кирко. ФГВ, 1975, 11, 6.
4. Б. А. Урюков. Изв. СО АН СССР. Серия техн. наук, 1975, 2, 21, 8.
5. А. В. Лыков. Теория теплопроводности. М., Гостехиздат, 1952.
6. С. И. Анисимов, Я. А. Имас и др. Действие излучения большой мощности на металлы. М., «Наука», 1970.
7. Л. Г. Лойцанский. Механика жидкости и газа. М., «Наука», 1976.
8. Х. С. Карслоу, Д. К. Эгер. Теплопроводность твердых тел. М., «Наука», 1964.
9. Н. В. Губарева, В. И. Кирко, Т. М. Соболенко. ФГВ, 1977, 13, 3.
10. Т. М. Аверьянова, Л. И. Миркин и др. ПМТФ, 1965, 6, 84.
11. А. А. Углов, Н. Н. Рыкалин, А. И. Кокора. Лазерная обработка материалов. М., Машиностроение, 1975.
12. Н. М. Кузнецов. Термодинамические функции и ударные адиабаты воздуха при высоких температурах. М., Машиностроение, 1965.
13. А. А. Дерibas, Н. В. Губарева и др.— В сб.: Тезисы докладов и сообщений Всесоюзного научно-технического совещания «Новые методы нанесения покрытий напылением». 12—14 октября 1976 г. Ворошиловград, 1976.

ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПОЛЯРИЗАЦИЯ ПРИ ИНИЦИИРОВАНИИ ДЕТОНАЦИИ ОДНОРОДНЫХ ВВ УДАРНОЙ ВОЛНОЙ

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

(Черноголовка)

В работах [1—3] для изучения инициирования детонации конденсированных ВВ использовалось явление ударной поляризации. Метод основан на том, что характерные особенности электрических сигналов связаны с определенными фазами процесса инициирования. В ряде слу-



Рис. 1. Иницирование детонации нитроглицерина.

а) экспериментальная осциллограмма, давление ударной волны 16,7 ГПа; б) $x-t$ -диаграмма процесса и расчетная зависимость $i \frac{R_e}{E_0}(t)$, $\tau' = 0,01$, $t'_4 = 0,3$, $t'_5 = 0,5$, $t'_6 = 0,67$, $t'_7 = 1,25$.

чаев это установлено непосредственно при помощи оптических методик. Настоящее сообщение посвящено исследованию поляризационных сигналов однородных ВВ, многостадийный механизм иницирования которых достаточно подробно изучен [4, 5].

Использованное в работе экспериментальное устройство представляет собой плоскопараллельный конденсатор с начальной емкостью C_0 [6]. Между металлическими электродами находилось исследуемое ВВ. Расстояние между электродами x_0 составляло $2,5 \div 3$ мм, что соответствует времени измерения $t_1 \sim 10^{-9}$ с. Нагрузкой этого поляризационного датчика являлось входное сопротивление осциллографа ОК-33 $R_e = 75$ Ом. Через заземленный электрод в датчик входила близкая к одномерной ударная волна, созданная взрывным устройством диаметром 80 и высотой 120 мм. Ее амплитуда подбиралась таким образом, чтобы получить в исследуемом образце задержку иницирования детонации $10^{-7} \div 10^{-6}$ с. Величина давления в образце рассчитывалась по известному состоянию материала электрода с использованием ударных адиабат исследуемых ВВ: нитроглицерина [7], пороха НБ [5] и нитрометана [8].

На рис. 1, а представлена осциллограмма опыта с нитроглицерином. Поляризационный сигнал отличается от наблюдаемых при стационарной детонации [6]. Вслед за первым положительным импульсом, возникающим при входе ударной волны в образец, в момент, обозначенный стрелкой, фиксируется небольшой дополнительный положительный, а затем отрицательный импульсы. Чтобы объяснить такое поведение поляризационного тока рассмотрим на $x-t$ -диаграмме (рис. 1, б) упрощенную схему иницирования нитроглицерина. В начальный момент $t=0$ через металлический экран в образец входит ударная волна и движется по веществу (линия OA), вызывая его электрическую поляризацию за счет ориентации молекулярных диполей. Сжатое вещество остается хорошим диэлектриком. Поляризованный слой обозначен штриховкой. Ширина его характеризуется временем релаксации поляризации τ [9]. При этом в цепи датчика действует поляризационная ЭДС. Поскольку в экспериментах постоянная времени $R_e C_0 \sim 10^{-9}$ с $\ll t_1$, можно считать, что ток в нагрузке будет течь только при изменениях ЭДС или емкости датчика. Вхождение ударной волны в образец и появление поляризационной ЭДС вызывает первый положительный им-

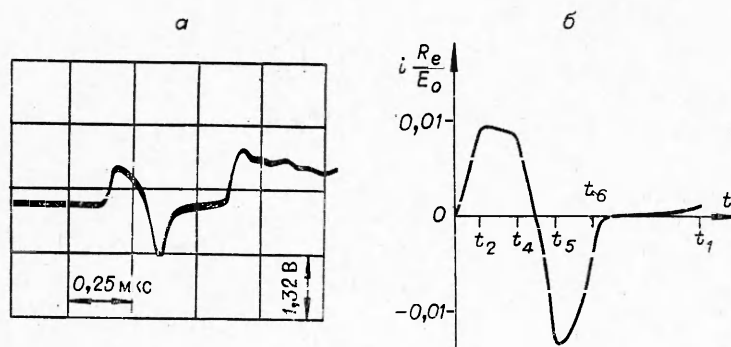


Рис. 2. Иницирование детонации пороха НБ.
 а) экспериментальная осциллограмма, давление ударной волны 16,5 ГПа; б) расчетная зависимость $i \frac{R_e}{E_0}(t)$, $\tau' = 1$, $t'_4 = 0,25$, $t'_5 = 0,4$, $t'_6 = 0,56$, $t'_7 = 1,2$.

пульс тока, емкость датчика при этом меняется незначительно. Длительность первого импульса близка к величине разновременности входа ударной волны в образец t_2 [10]. Через некоторое время задержки t_4 , равное периоду индукции реакции на границе с преградой, возникает очаг химического превращения, который в виде детонационной волны распространяется по сжатому веществу. Следует иметь в виду, что в реальном эксперименте реакция возникает не одновременно по всей поверхности электрода, а, как правило, сначала в центре датчика, где скорость спада давления за фронтом ударной волны минимальна.

Продукты детонации обладают значительной электропроводностью, поэтому поверхность их возникновения можно считать подвижной обкладкой поляризационного датчика [10]. Поскольку в ударно-сжатом нитроглицерине $\tau \sim 10^{-9}$ с [11], то первоначально эта обкладка движется по срелаксировавшему веществу, что приводит лишь к резкому увеличению емкости ячейки и, следовательно, к положительному импульсу тока. Когда же она достигнет поляризованного слоя, начнется уменьшение поляризационной ЭДС за счет проводимостной релаксации, что вызовет отрицательный ток. В момент t_5 сформируется нормальная детонационная волна в центре образца, а в момент t_6 — по всей его площади. Для простоты здесь не рассматривается явление пересжатия детонации. Задержка возникновения проводимости за ударным фронтом нормальной детонации обозначена как t_3 . Эта величина близка к периоду индукции химической реакции в детонационной волне.

В дальнейшем ЭДС будет оставаться постоянной и положительный ток будет постепенно возрастать за счет увеличения емкости датчика. В момент t_7 детонационный фронт достигнет второго электрода, и поляризационный сигнал прекратится.

Рассмотрим иницирование пороха НБ (рис. 2, а). Главное с точки зрения поляризации отличие этого случая от предыдущего — значительно большее время релаксации (выполняется условие $\tau \gg t_4$). Это показано специальными опытами по методике [12]. Поэтому уже при возникновении в момент t_4 очаг реакции находится в поляризованном веществе, вызывает уменьшение ЭДС и соответственно отрицательный импульс тока. Дальнейшее развитие электрического сигнала происходит так же, как и в случае нитроглицерина.

У нитрометана (рис. 3, а), напротив, время релаксации очень мало. Согласно [13], $\tau \ll 10^{-11}$ с, поэтому реализуется не только условие $\tau \ll t_4$, но и $\tau \ll t_3$, так как, по данным [14], $t_3 \sim 10^{-9}$ с. Это означает, что эффект проводимостной релаксации отсутствует и движение детонационной волны по сжатому веществу вызывает только положитель-

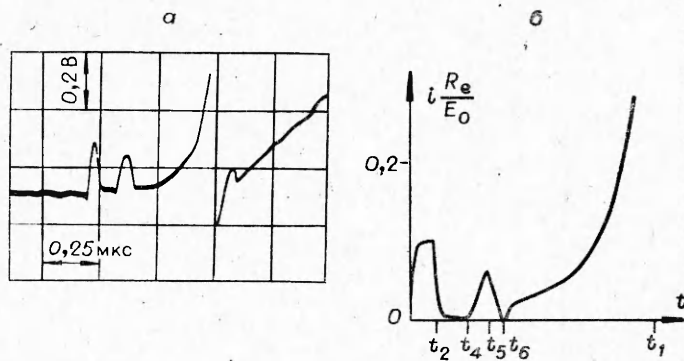


Рис. 3. Иницирование детонации нитрометана.
 а) экспериментальная осциллограмма, давление ударной волны 10,5 ГПа;
 б) расчетная зависимость $i \frac{R_e}{E_0}(t)$, $\tau' = 10^{-4}$, $t'_4 = 0,23$, $t'_5 = 0,31$, $t'_6 = 0,38$, $t'_7 = 1,1$.

ный ток за счет увеличения емкости. Чтобы убедиться, что указанные эффекты могут количественно обеспечить наблюдаемые импульсы, был рассчитан поляризационный ток при иницировании детонации по схеме, соответствующей рассмотренной $x-t$ -диаграмме, с учетом произвольной активной нагрузки датчика и неоднородности процесса.

Положим, что картина развития детонации симметрична относительно оси датчика. Введем систему r, x -координат, где r — радиус, а ось x совпадает с осью датчика. Сжатое и поляризованное диэлектрическое вещество ограничено с одной стороны ударным фронтом $x = x_1(t, r)$ и с другой — поверхностью $x = x_2(t, r)$. Последняя может быть или металлическим экраном, или поверхностью возникновения продуктов детонации. Тогда аналогично [9] поляризационная ЭДС

$$E(t, r) = \frac{P_0}{\epsilon_0 \epsilon_2} \int_{x_2}^{x_1} e^{-\frac{x_1-x}{(U-u)\tau}} dx = E_0 \left[1 - e^{-\frac{x_1-x_2}{(U-u)\tau}} \right],$$

где $E_0 = \frac{P_0 \tau (U-u)}{\epsilon_0 \epsilon_2}$; P_0 — начальная поляризация на фронте ударной волны; U — скорость ударного фронта; u — массовая скорость; ϵ_2 — диэлектрическая проницаемость сжатого вещества; $(x_1 - x)/(U-u)$ — время пребывания данного элемента объема в сжатом состоянии.

Будем считать, что искривление силовых линий электрического поля невелико. Тогда поляризационный датчик приближенно можно рассматривать как совокупность элементарных плоскопараллельных конденсаторов, для каждого из которых справедливо:

$$q(t, r) + R_e \cdot i(t) \cdot c(t, r) = E(t, r) \cdot c(t, r),$$

$$c(t, r) = \frac{C_0}{S_0} \frac{1}{1 + \left(\frac{1}{\kappa} \frac{x_1 - x_2}{U-u} - \frac{x_1}{U} \right) \frac{1}{t_7}}.$$

Здесь q и c — заряд и емкость на единицу поверхности; $\kappa = \epsilon_2 / \epsilon_1 \cdot U / (U-u)$; ϵ_1 — диэлектрическая проницаемость несжатого вещества; $t_7 = x_0 / U$; S_0 — площадь датчика; i — ток через нагрузку R_e (поляризационный ток).

Введем обозначения $y = \pi r^2 / S_0$, $f_1(t, y) = (x_1 - x_2) / (U-u)$, $f_2(t, y) = x_1 / U$. Проинтегрировав (1) по площади датчика, учитывая, что $Q(t) = \int_0^1 q dy$, $i(t) = dQ/dt$, где Q — заряд датчика, получим

$$\frac{dQ}{dt} + \frac{Q}{R_e C_0 \int_0^1 \frac{dy}{1 + \left(\frac{1}{\kappa} f_1 - f_2\right) \frac{1}{t_7}}} = \frac{E_0}{R_e} \cdot \frac{\int_0^1 \frac{1 - e^{-f_1/\tau}}{1 + \left(\frac{1}{\kappa} f_1 - f_2\right) \frac{1}{t_7}} dy}{\int_0^1 \frac{dy}{1 + \left(\frac{1}{\kappa} f_1 - f_2\right) \frac{1}{t_7}}}. \quad (2)$$

Задавая параметры $R_e C_0$, τ , κ , t_7 и функции f_1 и f_2 , можно найти заряд датчика и поляризационный ток по (2) с учетом начального условия $Q(0) = 0$.

Считалось, что инициирующая ударная волна и очаг химического разложения имеют формы параболоидов, симметричных относительно оси датчика. При этом нагруженная ударной волной площадь датчика растет линейно в интервале времени от 0 до t_2 . Поперечная площадь очага реакции на границе преграды также растет линейно от момента t_4 до некоторого момента $t_8 = t_4 + (t_4 - t_3)(t_5 - t_4) + t_2(t_5 - t_4)/(t_5 - t_3)$, когда химическое превращение распространится по всей площади датчика. Функции f_1 и f_2 в этом случае определяются следующим образом:

$$\begin{aligned} f_1 = f_2 = 0 & \text{ при } 0 \leq t \leq t_2, \quad t/t_2 \leq y \leq 1; \\ f_1 = f_2 = t - t_2 y & \text{ при } 0 \leq t \leq t_2, \quad 0 \leq y \leq t/t_2, \\ & t_2 \leq t \leq t_4, \quad 0 \leq y \leq 1, \\ & t_4 \leq t \leq t_8, \quad (t - t_4)/(t_8 - t_4) \leq y \leq 1; \\ f_1 = -\frac{t_4 - t_3}{t_5 - t_4} t + \frac{(t_4 - t_3)(t_6 - t_5)}{t_5 - t_4} y + \frac{t_5 - t_3}{t_5 - t_4} \cdot t_4, \\ f_2 = t - t_2 y & \text{ при } t_4 \leq t \leq t_8, \quad 0 \leq y \leq (t - t_4)/(t_8 - t_4), \\ & t_8 \leq t \leq t_5, \quad 0 \leq y \leq 1, \\ & t_5 \leq t \leq t_6, \quad (t - t_5)/(t_6 - t_5) \leq y \leq 1; \\ f_1 = t_3, \\ f_2 = \frac{t_7 - t_5}{t_1 - t_5} \cdot t - \left[t_2 + \frac{(t_7 - t_1)(t_6 - t_5)}{t_1 - t_5} \right] y - \frac{t_7 - t_1}{t_1 - t_5} t_5 & \text{ при } t_5 \leq t \leq t_6, \quad 0 \leq y \leq (t - t_5)/(t_6 - t_5), \\ & t_6 \leq t \leq t_1, \quad 0 \leq y \leq 1. \end{aligned}$$

Величины t_1 , t_4 , t_5 , t_6 получены при обработке экспериментальных осциллограмм поляризационного тока.

Рассчитанные на ЭВМ зависимости безразмерного поляризационного тока $i \cdot R_e / E_0$ от времени представлены на рис. 1—3. Они соответствуют осциллограммам, приведенным на этих же рисунках, и удовлетворительно с ними согласуются. Различия вызваны в основном отклонениями формы инициирующей ударной волны и детонационной волны, распространяющейся по сжатому веществу от параболоида. Значения временных параметров со штрихом приведены в безразмерном виде относительно $t_1 = 1$; общие для всех случаев: $\kappa = 1$, $R_e C_0 = 0,01$, $t_2' = 0$, $t_3' = 0,002$. Определенный вклад в наблюдаемые электрические сигналы могут вносить: дополнительная поляризация сжатого вещества детонационной волной, электрохимическая ЭДС [15], процессы, связанные с пересжатием детонации. Однако в настоящих экспериментах эти факторы качественно себя не проявили.

Таким образом, все особенности наблюдаемых при инициировании однородных ВВ поляризационных сигналов можно объяснить конкуренцией двух эффектов: емкостного и эффекта проводимостной релаксации. При этом характер сигнала в каждом конкретном случае качественно определяется соотношением времен релаксации поляризации, за-

держки возникновения проводимости за ударным фронтом нормальной детонации и периода индукции химической реакции за фронтом инициирующей ударной волны.

Поступила в редакцию
12/X 1978

ЛИТЕРАТУРА

1. J. R. Travis. Fourth Symposium (International) on Detonation, Washington, 1965, p. 609.
2. J. Morvan, H. Pujols. Fifth Symposium (International) on Detonation, California, 1970, p. 429.
3. Ю. Н. Тюняев, А. Г. Иванов, В. Н. Минеев. ФГВ, 1976, 12, 1.
4. R. F. Chaiken. J. Chem. Phys., 1960, 33, 760.
5. А. Н. Дремин, В. С. Трофимов и др. Детонационные волны в конденсированных средах. М., «Наука», 1970.
6. А. Г. Антипенко, А. Н. Дремин и др. ФГВ, 1975, 11, 3.
7. А. Н. Дремин, О. К. Розанов и др. ФГВ, 1967, 3, 1.
8. Compendium of shock wave data. Univ. Calif., 1966.
9. F. E. Allison. J. Appl. Phys., 1965, 36, 7.
10. А. Г. Антипенко, С. С. Набатов, В. В. Якушев. ФГВ, 1975, 11, 3.
11. С. С. Набатов, В. В. Якушев, А. Н. Дремин. ФГВ, 1976, 12, 2.
12. В. В. Якушев, О. К. Розанов, А. Н. Дремин. ЖЭТФ, 1968, 54, 2.
13. С. С. Набатов, В. В. Якушев, А. Н. Дремин. ФГВ, 1975, 11, 2.
14. B. Hayes. Tenth Symposium (International) on Combustion, Pittsburgh, 1965, p. 869.
15. A. N. Dremin, V. V. Yakushev. Acta Astronautica, 1974, 1.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ И РАСЧЕТ ТРОЙНЫХ КОНФИГУРАЦИЙ СПИНОВОЙ ДЕТОНАЦИИ

Ю. А. Николаев, М. Е. Топчиян, В. Ю. Ульяницкий

(Новосибирск)

До настоящего времени расчеты с учетом химического равновесия для спиновой детонации в плоской модели с поперечной волной проведены только для смеси $2\text{CO} + \text{O}_2$ [1, 2]. Схема течения, соответствующая указанной модели, изображена на рис. 1. Здесь скачки AA_1 и BC детонационные, а остальные ударные. Исходные данные для расчета — экспериментально определяемые угол φ при скачке AA_2 и полная скорость невозмущенного потока u_{00} .

Описанная в [3] методика машинного расчета равновесных детонационных волн позволяет при некотором усложнении программы [4] сделать расчеты тройных конфигураций для любых смесей, а также проанализировать, какое влияние на результаты оказывают возможные погрешности определения исходных величин (φ_{AA_2} , u_{00}).

Для получения исходных данных в трубе диаметром $d=21$ мм при $T_0=293$ К измерена продольная скорость детонационной волны с помощью фоторегистратора, получены следовые отпечатки для определения полной скорости движения потока и ее направления в системе координат, связанной с «головой» спина, получены также теплеровские