

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ ПРИ УДАРНОМ СЖАТИИ И ДЕТОНАЦИИ ЖИДКИХ ВВ

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

(Черноголовка)

В работе [1] обнаружено, что движение детонационной волны в жидком или твердом ВВ от одного «заземленного» металлического электрода конденсатора ко второму вызывает появление электрического тока во внешней пассивной электрической цепи, соединяющей электроды. Это явление названо [1] «детонационным электрическим эффектом» и отмечено, что оно может быть полезно при изучении как стационарной детонации, так и переходных процессов при инициировании ВВ.

Цель настоящей работы — изучение природы детонационного электрического эффекта на примере жидких ВВ. Наиболее подробно исследовался нитрометан.

Выбор жидких ВВ как объекта исследований в данном случае определялся легкостью создания воспроизводимых контактов с электродами и, кроме того, однородностью и изотропностью этих веществ, что значительно упрощает картину явления.

Эксперимент и результаты

В экспериментах использовался нитрометан марки ч., свежеперегнанный под вакуумом. Начальное удельное сопротивление нитрометана составляло примерно 10^4 Ом·м. Нитроглицерин, флегматизированный метанолом, отделялся от последнего многократным взбалтыванием с водой и сушился в течение месяца над хлористым кальцием. Тетранитрометан очищался вымораживанием.

Электрические сигналы регистрировались при помощи осциллографа ОК-33, конструкции ИФЗ АН СССР, имеющего входное сопротивление $R_e = 75$ Ом и время установления 20 нс. Развертка осциллографа запускалась за 0,5—1,5 мкс до момента выхода фронта ударной волны (ФУВ) в образец. Для этого сигнал с ионизационного датчика, расположенного в ВВ на расстоянии 40 мм от первого электрода, подавался предварительно на блок регулируемой задержки и затем на вход усилителя синхронизации ОК-33.

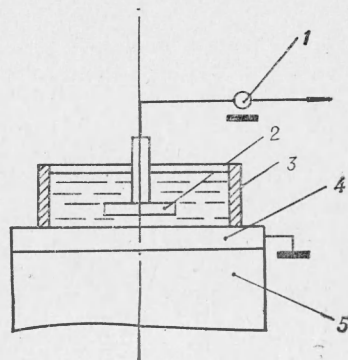


Рис. 1. Схема экспериментального устройства.

1 — кабель РК-75; 2 — второй электрод; 3 — сосуд с исследуемым ВВ \varnothing 50 мм; 4 — первый электрод \varnothing 80 мм; 5 — заряд ВВ \varnothing 80 мм.

Электрические сигналы регистрировались при помощи осциллографа ОК-33, конструкции ИФЗ АН СССР, имеющего входное сопротивление $R_e = 75$ Ом и время установления 20 нс. Развертка осциллографа запускалась за 0,5—1,5 мкс до момента выхода фронта ударной волны (ФУВ) в образец. Для этого сигнал с ионизационного датчика, расположенного в ВВ на расстоянии 40 мм от первого электрода, подавался предварительно на блок регулируемой задержки и затем на вход усилителя синхронизации ОК-33.

Схема экспериментального устройства, позволяющего осуществлять близкое к одномерному ударное нагружение исследуемого образца, показана на рис. 1. Первый электрод 4 толщиной 8 мм и второй электрод 2 \varnothing 15 мм были выполнены из алюминия АД-1. В отдельных экспериментах, для выяснения влияния на фиксируемые сигналы материала электродов, на поверхность первого из них наклеивался при помощи парафина 0,05 мм слой медной фольги. В этих опытах второй электрод также изготавливался из меди. Расстояние между электродами составляло 2,5—3 мм. Поверхность электрода 4, обращенная к исследуемому ВВ, полировалась.

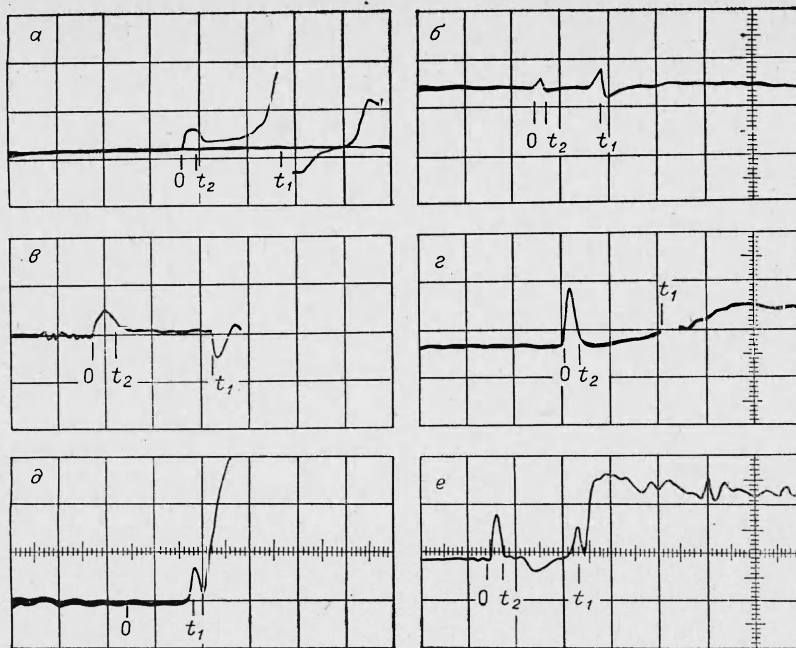


Рис. 2. Экспериментальные осциллограммы исследуемых нитрометана (а, в), нитроглицерина (б, з, е) и тетранитрометана (д). Масштаб времени 0,25 мкс/деление.

Чувствительность В/деление: а) 0,28, б) 1,45, в, д) 0,1, з, е) 0,4; давление во входящей волне, ГПа: а) 15,7, б) 20,6, в) 6,8, з) 16, е) 16,7; 0 — момент касания ФУВ образца, t_2 — момент полного входа ФУВ в образец, t_1 — момент достижения ФУВ второго электрода.

Величины динамических давлений в образцах рассчитывались по известному состоянию материала первого электрода с использованием ударных адиабат нитрометана [2] и нитроглицерина [3]. Давление в тетранитрометане не определялось. Наличие или отсутствие в нем детонации контролировалось при помощи фоторегистра.

Типичные осциллограммы, полученные в экспериментах, представлены на рис. 2. В дальнейшем примем за начало отсчета времени момент касания ФУВ образца. Момент достижения ФУВ второго электрода обозначим через t_1 . Под t_2 будем подразумевать разновременность входа ФУВ в исследуемое вещество, возникающую за счет отклонения реального нагружения от строго одномерного.

Для полярных ВВ — нитрометана и нитроглицерина — при входе ФУВ в ячейку всегда регистрируется положительный импульс напряжения, быстро спадающий до величины, близкой к нулю. Для быстрорелаксирующих диэлектриков длительность этого импульса практически совпадает с t_2 [4]. В дальнейшем характер электрического сигнала зависит от наличия или отсутствия в образце детонации. При давлении инициирующей волны, достаточном для возникновения детонации практически без задержки, вслед за первым импульсом происходит плавное нарастание сигнала, достигающего максимального значения в момент t_1 (рис. 2, а, б). Если детонация не возникает, то после короткого начального импульса напряжение остается близким к нулю (рис. 2, в, з).

В случае детонации неполярного тетранитрометана (рис. 2, д) максимальная амплитуда сигнала гораздо меньше, чем для нитрометана или нитроглицерина, причем первый пик не разрешается при максимальной чувствительности осциллографа, составляющей 0,14 В/см.

Электрические сигналы вблизи порога инициирования детонации в нитрометане изучались Трэвисом [5] с использованием аналогичного

Материал электрода	i_i , мА	$Q_1 \cdot 10^{10}$, Кл	i_m , мА	$Q_2 \cdot 10^{10}$
Al	6,15	4,31	1,44	1,45
	8,83	5,50	1,31	1,59
	7,13	5,10	1,16	1,50
	8,95	5,63	1,55	1,30
	9,47	4,98	1,28	1,17
	10,67	6,42	1,72	1,33
	Среднее 8,53±0,45	5,32±0,20	1,41±0,6	1,39±0,04
Cu	5,44	3,41	0,87	0,93
	6,76	4,29	1,28	0,75
	5,09	3,36	1,99	0,84
	7,75	3,94	0,95	0,63
	6,80	4,33	1,11	0,88
	5,67	2,98	0,72	0,70
	Среднее 6,25±0,28	3,72±0,15	1,16±0,12	0,79±0,3

нашему экспериментального устройства. Было показано, что при этом вслед за положительным импульсом, соответствующим входу волны в образец, возникают еще положительный и затем отрицательный импульсы, связанные с процессом многостадийного инициирования. На рис. 2, е дана осциллограмма, полученная при инициировании детонации в нитроглицерине с задержкой около 0,3 мкс. Видно, что в этом случае второй положительный импульс выражен слабо и наблюдается практически только один дополнительный отрицательный импульс, после которого происходит обычное нарастание сигнала, характерное для режима детонации.

При изучении детонационного электрического эффекта Хейз [1] отметил, что на величину регистрируемых сигналов влияет природа металлов как первого, так и второго электрода. Этот интересный факт заслуживает дальнейшего изучения.

В настоящей работе сравнивались конечный ток i_1 и заряд Q_1 , выделившейся за время от t_2 до t_1 для медных и алюминиевых электродов при детонации нитрометана. Амплитуда инициирующей волны в этих экспериментах составляла 15,7 ГПа. Результаты, полученные в сериях из 6 одинаковых опытов, сведены в таблице, где даны также максимальный ток первого импульса i_m и заряд Q_2 , выделившийся в течение времени от начала записи до t_2 . В последнем столбце указаны соответствующие средние значения и вероятные ошибки.

Отметим, что сравнение токов i_m и зарядов Q_2 , вообще говоря, прямо не характеризует зависимость эффективной ЭДС от природы металла, так как амплитуда входящей в образец волны для комбинированных алюминий-медных электродов ниже, чем для алюминиевых. За счет малой толщины слоя меди, спустя $\sim 0,1$ мкс, давления в обоих случаях практически выравниваются. Поэтому различие величин i_1 и Q_1 для медных и алюминиевых электродов свидетельствует о влиянии природы металла на фиксируемые сигналы.

Обсуждение результатов

Наблюдаемые зависимости тока от времени хорошо объясняются в рамках модели ударной поляризации быстрорелаксирующих диэлектриков, рассмотренной в [4], где предполагалось, что в цепи экспери-

ментального устройства действует постоянная ЭДС E_0 , а форма сигналов определяется величиной сопротивления нагрузки R_e , одновременностью входа ФУВ в образец t_2 и параметрами ячейки, изменяющимися в процессе ударного сжатия. Проиллюстрируем это на примере нитрометана.

Рассмотрим сначала случай отсутствия в образце детонации. Необходимые для расчетов электрические свойства нитрометана за ФУВ были определены предварительно в специальных экспериментах. Удельное сопротивление ρ_2 измерялось аналогично [6]. Диэлектрическая проницаемость ϵ_2 и время релаксации поляризации τ были получены методом колебательного контура [7] с несколько видоизмененной для учета паразитного затухания, не связанного с диэлектриком, расчетной формулой.

Для определенности все измеренные величины приведем при давлении за ФУВ $p=6,8$ ГПа, соответствующему осциллограмме рис. 2, в. При этом давлении сжатие $\sigma=1,56$. Для нитрометана с $\rho_1=10^4$ Ом·м, $\rho_2=1,5 \cdot 10^4$ Ом·м, $\kappa = \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} \sigma = 1,0$, τ порядка 10^{-11} с. Отметим, что такая величина τ характерна для всего интервала изученных давлений вплоть до давления начала инициирования. Поэтому разумно предположить, что и при детонации, когда из-за высокой электропроводности прямые измерения τ невозможны, время релаксации имеет тот же порядок величины.

Измеренная начальная емкость C_0 экспериментальной ячейки оказалась равной 50 пФ, что дает $R_e C_0 \approx 3,7 \cdot 10^{-9}$ с. Величина t_2 изменялась случайным образом от опыта к опыту в пределах $5 \cdot 10^{-8}$ — $15 \cdot 10^{-8}$ с.

Таким образом, при указанном значении динамического давления, нитрометан остается хорошим диэлектриком, емкость ячейки практически не меняется в процессе сжатия ($\kappa=1$), выполняются условия $\tau \ll R_e C_0$, $\tau \ll t_2$. Все это позволяет непосредственно применить в данном случае для расчета тока во внешней цепи соотношения, полученные в [4].

$$i = \frac{E_0 C_0}{t_2} (1 - e^{-t/R_e C_0}), \quad 0 \leq t \leq t_2,$$

$$i = \frac{E_0 C_0}{t_2} (1 - e^{-t_2/R_e C_0}) e^{-\frac{t-t_2}{R_e C_0}}, \quad t_2 \leq t \leq t_1. \quad (1)$$

На рис. 3, а электрический сигнал, рассчитанный по этим формулам, представлен совместно с зависимостью тока от времени, полученной в одном из экспериментов. Величина эффективной ЭДС E_0 , действующей в цепи при $p=6,8$ ГПа, оказалась равной ~ 2 В.

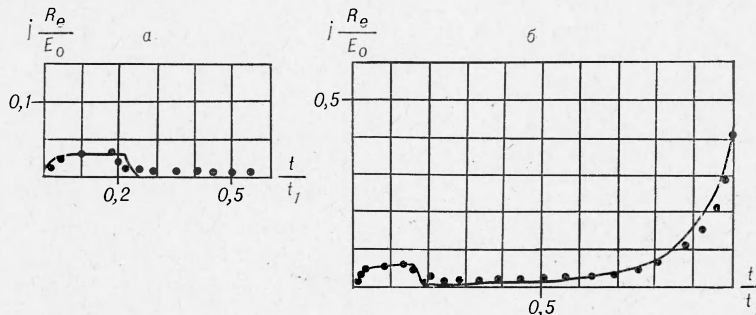


Рис. 3. Зависимости тока от времени. Сплошная кривая — расчет по (1), точки — эксперимент при $p=6,8$ (а) и $15,7$ ГПа (б).

В отличие от ударного сжатия ниже порога инициирования режим детонации нитрометана характерен возникновением переходной зоны электропроводности. Как было показано Хейзом [8], удельное сопротивление при детонации нитрометана начинает резко падать только спустя несколько наносекунд за фронтом детонационной волны и достигает минимального значения $\rho_2 \simeq 6,2 \cdot 10^{-3}$ Ом·м. Обозначим величину задержки появления высокой электропроводности через t_3 . Из изложенного следует, что в наших экспериментах справедливы условия $t_3 \ll t_2$, $\rho_2 \epsilon_0 \epsilon_2 < t_1$ ($\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м), $\tau \ll t_3$, позволяющие применить решения [4] для тока в цепи поляризационного датчика при наличии переходной зоны электропроводности за ФУВ. Соответствующие расчетная кривая и точки, полученные в эксперименте, даны на рис. 3, б. Величина E_0 для режима детонации, оцененная из амплитуды и длительности начального импульса тока по соотношению $i_m = \frac{E_0 C_0}{t_2}$, являющемуся в данном случае приближенным, составляет около 2,5 В.

Отметим, что, согласно [4], конечный ток i_1 должен быть равен $\frac{E_0}{R_e}$. На самом деле, в экспериментах величина i_1 имеет большой разброс и оказывается меньше $\frac{E_0}{R_e}$, если E_0 определить из начального импульса. Этот факт можно объяснить следующими причинами. Сигнал прекращается в момент достижения ФУВ второго электрода. Проводящая поверхность отстоит от электрода в этот момент на расстоянии $t_3 v$, где v — скорость детонации. Ток в этот момент меньше $\frac{E_0}{R_e}$ и зависит от случайной величины t_2 . Кроме того, за счет конечной полосы пропускания, усилитель осциллографа заваливает фронт второго импульса, имеющий значительную крутизну вблизи t_1 .

Резюмируя изложенное выше, можно заключить, что как в случае отсутствия детонации в образце, так и при ее наличии характер регистрируемых сигналов можно объяснить изменением комплексного сопротивления ячейки в процессе сжатия. При этом эффективная ЭДС, действующая в цепи, оказывается приблизительно постоянной и имеет величину порядка нескольких вольт.

При одинаковых металлах электродов существуют две наиболее вероятные причины возникновения такой ЭДС — ударная поляризация и электрохимические процессы на границе раздела фаз металл — продукты детонации [9, 10]. Явление ударной поляризации всегда возникает при движении ФУВ по полярному диэлектрику за счет ориентации асимметричных молекулярных диполей в поле сил ударного перехода. Для быстрорелаксирующих диэлектриков, каким, в частности, является нитрометан, ЭДС в этом случае связана с начальной поляризацией P_0 на ФУВ соотношением

$$E_0 = \frac{P_0 \tau (v - u)}{\epsilon_0 \epsilon_2} \quad (2)$$

(см., например, [4]), где u — скорость вещества за ФУВ.

Оценим величину P_0 в нитрометане при $p = 6,8$ ГПа. Для этого давления $\tau \simeq 10^{-11}$ с, $v - u = 3,6 \cdot 10^3$ м/с, $\epsilon_2 = 25$, $E_0 = 2$ В. Подставляя в (2) указанные численные значения, получаем $P_0 = 1,2 \cdot 10^{-2}$ Кл/м². Интересно, что эта величина примерно на два порядка превышает начальную поляризацию, реализуемую при таком же динамическом давлении в пластмассах [11].

Исходя из величины дипольного момента нитрометана $1,18 \times 10^{-29}$ Кл·м, с учетом сжатия $\sigma = 1,56$, максимально возможная P_0 при полной ориентации всех молекул равна 0,2 Кл/м². Отсюда нетрудно ви-

деть, что эффективная степень ориентации молекул в ударном переходе составляет $\sim 6\%$, что является вполне разумной величиной. Естественно, что ударной поляризацией, происходящей в объеме диэлектрика, нельзя объяснить наблюдаемой зависимости фиксируемых сигналов от металла электродов. Аналогично [12], из данных, приведенных в таблице, можно сделать вывод, что определенный вклад в ЭДС вносят процессы, происходящие на границе металл — продукты детонации.

Поскольку электропроводность продуктов детонации нитрометана имеет преимущественно ионную природу [10], можно предположить, что изменение граничного потенциала связано с переходом ионов металла в продукты детонации и (или) с процессами специфической адсорбции. Известно, что явление ударной поляризации не наблюдается в неполярных веществах. Поэтому, если отвлечься от влияния возможных полярных примесей, электрический сигнал в тетранитрометане следует приписать только процессам в приэлектродном слое.

Как следует из [4], амплитуда первого импульса тока i_m прямо пропорциональна $R_e C_0$. Поэтому неразрешимо малая величина i_m в данном случае связана, главным образом, с низким значением относительной диэлектрической проницаемости тетранитрометана, равной 2,3, что, в свою очередь, приводит к уменьшению параметра $R_e C_0$ по сравнению с нитрометаном примерно в 16 раз.

Электрические сигналы, фиксируемые в экспериментах с нитроглицерином, аналогичны наблюдаемым в нитрометане, за исключением режима инициирования детонации с небольшой задержкой. Как отмечалось выше, в этом случае на зависимости тока от времени появляются дополнительные импульсы противоположной полярности, имеющие для нитрометана и нитроглицерина существенно различные отношения амплитуд. Хотя не вызывает сомнений, что эти импульсы непосредственно связаны с процессом многостадийного инициирования, детальное выяснение их природы требует дополнительного изучения.

Проведенные эксперименты показывают, что причинами возникновения электрических сигналов при ударном сжатии и детонации жидких ВВ являются индуцированная ударной волной поляризация в объеме диэлектрика и изменение потенциала металлического электрода в электропроводных продуктах детонации, имеющее электрохимическую природу. Характер сигналов определяется изменением комплексного сопротивления экспериментальной ячейки в процессе сжатия.

В заключение авторы считают своим приятным долгом поблагодарить Л. А. Ананьеву и Е. Е. Чемагина за помощь при проведении экспериментов.

Поступила в редакцию
21/VI 1974

ЛИТЕРАТУРА

1. В. Н а у е с. J. Appl. Phys., 1967, 38, 2.
2. Compendium of shock wave data. Univ. Calif. 1966, vol. II.
3. А. Н. Д р е м и н, О. К. Р о з а н о в и др. ФГВ, 1967, 3, 1.
4. А. Г. А н т и п е н к о, С. С. Н а б а т о в, В. В. Я к у ш е в. ФГВ, 1975, 11, 3.
5. J. R. T r a v i s. Proceedings — Fourth Symposium (International) on Detonation, Washington, 1965, p. 609.
6. В. В. Я к у ш е в, С. С. Н а б а т о в, О. Б. Я к у ш е в а. Физические свойства и превращение акрилонитрила при высоких динамических давлениях. ФГВ, 1974, 10, 4.
7. В. В. Я к у ш е в, С. С. Н а б а т о в, А. Н. Д р е м и н. Горение и взрыв. М., «Наука», 1972.
8. В. Н а у е с. Tenth Symposium (International) on Combustion, Combustion Inst., Pittsburgh, 1964.
9. В. В. Я к у ш е в, А. Н. Д р е м и н. ЖФХ, 1971, 45, 1.

10. A. N. Drem in, V. V. Yakushev. Electrochemical effects at nitromethane detonation. Acta Astronautica (in press).
11. G. E. Hauver. J. Appl. Phys., 1965, 36, 7.
12. О. Н. Бреусов, А. Н. Дремин и др. ЖЭТФ, 1971, 61, 9.

УДК 532.593

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ ПРИ УДАРНОМ НАГРУЖЕНИИ КОНТАКТА МЕТАЛЛОВ

В. Ф. Нестеренко

(Новосибирск)

Первыми по электрическим эффектам при ударном нагружении металлов, по-видимому, являются работы [1, 2]. В [3] была предпринята попытка объяснить аномальную величину измеряемой ЭДС по сравнению с ожидаемой на основе температуры ударного сжатия. Наиболее вероятным механизмом этого эффекта, по мнению авторов [3], является превышение электронной температуры над решеточной. Следует отметить также работы [4—6], в которых развивается гипотеза фононного увлечения. В работах [7, 8], где исследовалась пара Al—V, высказано предположение, что электрический сигнал, возникающий до выхода ударной волны из V на второй контакт и не зависящий от толщины образцов, может быть связан с диффузией электронов через фронт ударной волны. При исследовании пары Cu—Ni в [9] получено среднее значение ЭДС, существенно меньшее, чем в работах [1—6]. Расхождение измеряемой ЭДС и расчетной (по температуре ударного сжатия) в [9] связывается с зависимостью коэффициента термо-ЭДС от давления и неточностью расчетных формул для граничной температуры двух материалов. В работе [10] отмечается, что возможным механизмом электрических сигналов, наблюдаемых в [1—6], является ударная поляризация металлов. Поведение электрических сигналов при ударном сжатии лантаноидов, по мнению авторов [11], в ряде случаев позволяет исключить из рассмотрения контактную разность потенциалов. Оценка сверху ЭДС по механизму ударной поляризации [8] дает значение порядка 10^{-3} В для типичных металлов, что на порядок меньше величин, наблюдаемых в опытах. В то же время [8] не исключена роль этого эффекта в металлах типа висмута. В работах [12—14] анализировались эксперименты по ударному нагружению висмута с точки зрения существования тепловой волны перед фронтом ударной волны. В [15, 16] изучалось несколько пар металлов с целью использования их в качестве датчиков давления. На основе измерения ЭДС, возникающей при набегании на контакт медь — константан возрастающего профиля давления, в [17] сделан вывод, что сигнал у этой пары определяется, в основном, давлением, существующим в данный момент на контакте. Авторы работ [18, 19] причиной аномальной величины сигналов пары Cu—Ni считают превышение температуры контакта над температурой ударного сжатия за счет скопления поверхностных слоев контактирующих металлов при прохождении через контакт ударной волны. В [18] показана возможность измерения температуры в процессе соударения пластин и ударном нагружении порошков.

Подводя некоторые предварительные итоги, можно сделать вывод, что электрические процессы, происходящие на фронте сильной ударной