

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НИТРОМЕТАНА ПРИ УДАРНОМ СЖАТИИ

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

(Черноголовка)

В работе представлены результаты измерений удельного сопротивления ρ_2 , относительной статической диэлектрической проницаемости ϵ_2 и оценки времени релаксации электрической поляризации τ_2 нитрометана, сжатого ударной волной, амплитуда которой варьировалась от 0,79 до 8,69 ГПа. В этом диапазоне давлений время задержки инициирования детонации превышало 1 мкс [1—3], что было достаточно для проведения измерений в непрореагировавшем веществе. Высокая электропроводность продуктов взрыва нитрометана [4] исключала возможность определения ϵ_2 и τ_2 в режиме детонации.

На основании проделанных экспериментов получена качественная информация о характере межмолекулярных взаимодействий и рассчитана вязкость нитрометана при высоких динамических давлениях.

Эксперимент и результаты

Применявшиеся в опытах взрывное устройство и конденсаторная ячейка, позволяющие реализовать близкое к одномерному однократное ударное нагружение образца, описаны в [5]. Исходное расстояние между экраном и электродом ячейки составляло 3 мм, диаметр электрода 20 мм. В большинстве экспериментов использовался нитрометан марки «ч», имеющий плотность 1,13 г/см³.

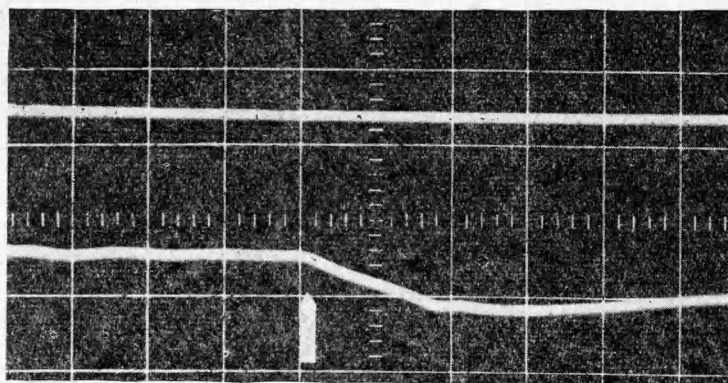
Давление p и сжатие σ за фронтом ударной волны (ФУВ) находились методом отражения по известному состоянию материала экрана и ударной адиабате нитрометана $U=1,55+1,72u$ [6], где U — скорость ударной волны, u — массовая скорость за ФУВ. Удельное сопротивление ударно-сжатого нитрометана определялось аналогично [5]. При этом величины добавочных сопротивлений выбирались таким образом, чтобы постоянная времени измерительной цепи не превышала 0,2 мкс.

Из рассматриваемых ниже экспериментов по измерению диэлектрической проницаемости за ФУВ можно заключить, что при ударном сжатии емкость ячейки практически не меняется в течение времени измерения электропроводности. Это позволило пренебречь током смещения при расчете ρ_2 .

Контрольные опыты без подачи напряжения на ячейку показали, что электрические сигналы, возникающие при прохождении ФУВ по образцу, практически исчезают в момент касания ударной волной электрода и, следовательно, не влияют на точность измерений.

В некоторых экспериментах использовался нитрометан с различным начальным удельным сопротивлением ρ_1 . Широкий диапазон изменения ρ_1 достигался введением в предварительно перегнанное под вакуумом вещество различных количеств ионогенной смеси CsJ.

Типичная осциллограмма, полученная в одном из опытов по измерению электропроводности, представлена на рисунке. Видно, что при входе ФУВ в нитрометан фиксируется увеличение абсолютной величины начального отброса напряжения. Это соответствует росту активного сопротивления ячейки при сжатии. Результаты измерений сведены в табл. 1, где звездочкой обозначены опыты с добавкой CsJ.



Экспериментальная осциллограмма. Давление за ФУВ 3,03 ГПа. Масштаб времени 0,54 мкс/деление. Стрелкой показан момент входа ударной волны в нитрометан.

Как видно из таблицы, во всей изученной области давлений наблюдается уменьшение электропроводности нитрометана при переходе через ФУВ. Обращает на себя внимание также то, что отношение ρ_2/ρ_1 для фиксированного давления практически не меняется при изменении ρ_1 в несколько десятков раз.

Диэлектрическая проницаемость ϵ_2 сжатого нитрометана измерялась, а время релаксации поляризации оценивалось методом колебательного контура [7] на частоте ~ 10 МГц. При этом производилась предварительная калибровка затухания колебательного процесса в контуре жидкостями с известными временами релаксации, что позволило учесть при оценке τ_2 паразитные потери, связанные с диэлектриком. В этих опытах использовался перегнанный под вакуумом нитрометан с $\rho_1 = 10^4$ Ом·м. Погрешность измерений ϵ_2 составляла $\sim 5\%$. Результаты экспериментов представлены в табл. 2.

Из таблицы видно, что при давлении 0,79 ГПа ϵ_2 мало отличается от значения в нормальных условиях. При дальнейшем повышении давления наблюдается уменьшение ϵ_2 , причем между ϵ_2 и σ имеет место линейная зависимость

$$\epsilon_2 = 84 - 37,5\sigma \quad (1,18 \leq \sigma \leq 1,61).$$

Согласно данным, приведенным в [8], в обычных условиях при температуре 20°С время релаксации электрической поляризации нитрометана $\tau_1 = 4,4 \cdot 10^{-12}$ с. Эта величина является слишком малой для надежного измерения методом колебательного контура [7]. Аналогичная ситуация возникла и при попытке измерить τ_2 нитрометана за ФУВ. Поэтому в результате экспериментов оказалось возможным только заключить, что во всем исследованном интервале давлений величина τ_2 не превышает $3 \cdot 10^{-11}$ с. Полученная оценка времени релаксации свидетельствует, в частности, о том, что при выбранной частоте колебательного процесса в контуре (~ 10 МГц) измерялась именно статическая диэлектрическая проницаемость нитрометана.

Таблица 1

ρ , ГПа	σ	$\rho_1 \cdot 10^{-2}$, Ом·м	ρ_2/ρ_1
0,79	1,18	5,70	1,77
3,03	1,40	11,0	1,97
3,03	1,40	12,5*	1,97
3,03	1,40	3,92*	1,96
3,03	1,40	0,29*	2,13
6,78	1,56	6,48	1,52
6,78	1,56	5,25*	1,81
6,78	1,56	0,21*	2,22
8,69	1,61	62,7	1,37

Таблица 2

p , ГПа	σ	ϵ_2
0	1,00	38,6
0,79	1,18	39,6
3,03	1,40	32,0
4,41	1,47	28,5
5,99	1,54	26,7
8,69	1,61	23,7

Отметим, что уменьшение диэлектрической проницаемости при динамическом сжатии нитрометана была зафиксирована также в работе [9], соответствующие результаты которой находятся в качественном согласии с нашими измерениями ϵ_2 . Этого нельзя сказать о приведенных там же данных по электропроводности нитрометана за ФУВ. Одной из вероятных причин имеющихся расхождений является наличие в экспериментах [9] поляризации электродов исходным напряжением, что могло привести к существенному занижению величины ρ_2 .

Обсуждение результатов

Независимость отношения $\frac{\rho_2}{\rho_1}$ от ρ_1 при одном и том же давлении за ФУВ свидетельствует об отсутствии в сжатом нитрометане за время наблюдения изменения числа носителей тока. Поэтому наблюдаемое увеличение удельного сопротивления при динамическом нагружении следует приписать уменьшению подвижности имеющихся в образце примесных ионов. Этот факт позволяет определить вязкость η_2 ударно-сжатого нитрометана на основании приближенного соотношения Вальдена — Писаржевского [10], которое для нашего случая запишется в виде

$$\rho_1 \eta_2 = \rho_2 \sigma \eta_1, \quad (1)$$

где η_1 — вязкость вещества при нормальных условиях.

Далее, зная отношение вязкостей η_2/η_1 , абсолютную температуру за ФУВ T_2 и значение τ_1 при нормальных условиях, можно оценить τ_2 при высоких динамических давлениях, воспользовавшись соотношением

$$\frac{\tau_2}{\tau_1} = \frac{\eta_2}{\eta_1} \frac{T_1}{T_2}, \quad (2)$$

которое легко получить из формулы Дебая

$$\tau = \frac{4\pi a^3 \eta}{kT}, \quad (3)$$

где a — радиус молекулы; k — постоянная Больцмана.

Результаты расчетов $\frac{\eta_2}{\eta_1}$ и τ_2 сведены в табл. 3, где даны также значения абсолютных температур на ударной адиабате нитрометана, определенные по уравнению состояния [11].

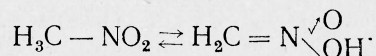
Из таблицы следует, что как вязкость, так и время релаксации поляризации мало меняются при переходе через ФУВ во всем исследованном диапазоне давлений. Это можно объяснить противоположным влиянием на указанные величины сжатия и разогрева вещества в ударной волне. Отметим, что рассчитанные по формуле (2) времена релаксации хорошо согласуются с полученной выше экспериментальной оценкой.

В работе [12] изучалась зависимость периода индукции взрывчатого превращения нитрометана от начальной температуры и статического давления, максимальная величина которого составляла 5,0 ГПа. Было показано, что увеличение давления приводит к

Таблица 3

p , ГПа	T_2 , К	η_2/η_1	$\tau_2 \cdot 10^{12}$, с
0	293	1,0	4,4 [8]
0,79	375	2,1	7,2
3,03	574	2,8	6,3
6,78	900	2,9	3,7
8,69	1060	2,2	2,7

уменьшению времени развития реакции во взрыв. Авторы выдвинули предположение об определяющей роли в ускорении химической реакции метаннитроновой кислоты, которая могла образовываться при изомеризации нитрометана



Полученные в настоящей работе данные свидетельствуют в пользу отсутствия заметной изомеризации нитрометана при высоких динамических давлениях по крайней мере в течение времени наблюдения (~ 1 мкс). Действительно, если бы при воздействии ударной волны имела место быстрая реакция изомеризации, то следовало бы ожидать увеличения электропроводности вещества за счет диссоциации кислоты. Однако, как было показано выше, за ФУВ в нитрометане новых носителей тока не образуется.

Качественную информацию о микроструктуре жидкого нитрометана при высоких динамических давлениях можно получить на основании измеренных величин ϵ_2 .

В теории Онзагера—Кирквуда—Фрелиха [13], связывающей статическую диэлектрическую проницаемость полярной жидкости ϵ_s с величиной дипольного момента индивидуальной молекулы μ , вводится корреляционный фактор $g=1+z \cos \gamma$. Здесь z — среднее число молекул, связанных с данной полярной молекулой короткодействующими силами, $\cos \gamma$ — среднее значение косинуса угла между направлениями диполей выбранной молекулы и ее ближайших соседей. Таким образом, зная величину g , можно судить о молекулярной структуре жидкости. В частности, полностью хаотическое распределение направлений дипольных моментов молекул соответствует $g=1$.

Зависимость между ϵ_s , g и μ дается формулой

$$g\mu^2 = \frac{(\epsilon_s - \epsilon_\infty)(2\epsilon_s + \epsilon_\infty)}{3\epsilon_s} \left(\frac{3}{\epsilon_\infty + 2} \right)^2 \frac{3V_m k T \epsilon_0}{N}, \quad (4)$$

где N — число Авогадро; V_m — киломолярный объем; ϵ_∞ — высокочастотная диэлектрическая проницаемость, $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$ Ф/м.

Рассчитанные по этой формуле значения g для различных динамических давлений приведены в табл. 4. Там же даны величины ϵ_∞ , определенные аналогично [5], и T_2 . При расчетах предполагалось, что дипольный момент нитрометана не изменяется при ударном сжатии и остается равным $1,18 \cdot 10^{-29}$ Кл·м [14].

Как видно из табл. 4, параметр g остается близким к единице во всей изученной области давлений. Это свидетельствует о практическом отсутствии корреляции в ориентациях дипольных моментов молекул в сжатом веществе.

Таким образом, при ударном сжатии нитрометана в диапазоне давлений от 0,79 до 8,69 ГПа:

- 1) вещество не претерпевает заметных химических превращений;
- 2) исходные значения вязкости и времени релаксации поляризации мало меняются;
- 3) сохраняется хаотическое распределение направлений молекулярных диполей.

Поступила в редакцию
27/VI 1974

ЛИТЕРАТУРА

1. A. W. Campbell, W. C. Davis, J. R. Travis. Phys. Fluids, 1961, 4, 4.
2. И. М. Воскобойников, В. М. Богомолов и др. Докл. АН СССР, 1966, 167, 3.
3. F. E. Walker, R. J. Wasley. Combust. and Flame. 1970, 15, 3.
4. В. Hayes. Electrical measurements in reaction zone of high explosives. Tenth Sympos. (Internat.) on Combustion, Combustion Inst., Pittsburgh, 1964.
5. В. В. Якушев, С. С. Набатов, О. Б. Якушева. ФГВ, 1974, 10, 4, 583.
6. Compendium of shock wave data. Univ. Calif., vol. II.
7. В. В. Якушев, С. С. Набатов, А. Н. Дремин. Горение и взрыв. М., «Наука», 1972.
8. В. В. Левин, Е. А. Овсян, В. И. Овчинников. ЖФХ, 1971, 45, 9.
9. А. Н. Дремин, А. Н. Михайлов. ФГВ, 1973, 9, 3.
10. В. В. Скорчеллетти. Теоретическая электрохимия. Л. «Химия», 1970.
11. F. C. Lynne, D. R. Hagedsty. J. Chem. Phys., 1973, 59, 12.
12. E. L. Lee, R. H. Sanborn, H. D. Stromberg. Thermal decomposition of high explosives at static pressure 10—50 kilobars. Proceedings Fifth Sympos. (Internat.) on Detonation, Office of naval research — Department of the navy, Arlington, 1970.
13. Г. Фрелих. Теория диэлектриков. М., ИЛ, 1960.
14. О. А. Осипов, В. И. Минкин, А. Д. Гарновский. Справочник по дипольным моментам. М., «Высшая школа», 1971.

УДК 627.74.001.5

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ГАЗОВЫХ ПОЛОСТЕЙ ОТ ВЗРЫВА СФЕРИЧЕСКИХ И УДЛИНЕННЫХ ЗАРЯДОВ ПОД ВОДОЙ

В. С. Перехвальский, А. Н. Салов, Г. В. Ставер

Как известно [1—4], при подводных дноуглубительных работах и в строительстве направленные взрывы создаются благодаря одновременному взрыванию системы зарядов в определенной последовательности [1—4]. При этом проблема оптимального размещения зарядов и выбора интервала замедления имеет первостепенное значение как для разрушения пород, так и для направленного их перемещения.

В данной работе рассматриваются подводные направленные взрывы. Точный расчет времени замедления и соответствующего ему оптимального расстояния между зарядами затрудняется вследствие сложности картины движения при взрывах на ограниченной глубине, где сказывается влияние двух граничных поверхностей: жесткого дна и свободной поверхности. Делается попытка на основе модельных исследований изучить физическую картину взаимодействия газовых полостей от взрывов сосредоточенных и удлинённых зарядов в воде (при ограниченной глубине) и влияние различных факторов на эффект направленности.

Исследование взаимодействия сферических газовых полостей

Новосибирским институтом инженеров водного транспорта совместно с Институтом гидродинамики СО АН СССР были проведены обширные модельные исследования. Вместо ВВ использовалась медная проволочка длиной 7 мм и диаметром 0,1 мм, электровзрыв которой осуществляется с помощью мгновенного разряда батареи конденсаторов емкостью 0,5÷1,5 мкФ и напряжением 16 кВ.

Процесс взрыва фиксировался сверхскоростным фоторегистратором (СФР) со скоростью съемки от 10 до 300 тыс. кадров в секунду.