

турбулизации потока из-за его реальной неоднородной ячеистой структуры, потерь (на трение и нагрев стенок) и пограничного слоя.

Результаты измерений профилей давления приведены на рис. 6, где нанесены также экспериментальные и расчетные данные других авторов.

Итак, в работе применена для измерения скорости проводящей среды новая электромагнитная методика и экспериментально показана возможность измерения с ее помощью профилей массовой скорости в детонационных волнах.

В заключение авторы благодарят В. В. Митрофанова за внимание к работе.

Поступила в редакцию 14/1 1983

ЛИТЕРАТУРА

1. Дж. Шерклиф. Теория электромагнитного измерения расхода. М.: Мир, 1965.
2. А. Б. Ватажин, Г. А. Любимов, С. А. Регирер. Магнитогиродинамические течения в каналах. М.: Наука, 1970.
3. M. Sakuntala, V. E. Clotfelter, W. B. Edwards e. a. J. Appl. Phys., 1959, 30, 11.
4. M. L. Bowser, J. N. Murphy e. a. J. Appl. Phys., 1966, 37, 6.
5. Р. И. Солоухин. ТВТ, 1966, 4, 2.
6. D. H. Edwards, D. B. Brown, G. Hooper e. a. J. Phys. D: Appl. Phys., 1970, 3, 3.
7. I. Fells, P. W. Norman. Comb. Flame, 1970, 15, 1.
8. M. Veysiere. Thèse de docteur ès sciences physiques, L'université de Poitiers, 1971.
9. Г. В. Пряхин, В. М. Титов, Г. А. Швецов. ПМТФ, 1971, 3.
10. G. Hooper, D. B. Brown, C. Brochet e. a. Comb. Flame, 1971, 17, 1.
11. А. П. Ершов. ПМТФ, 1974, 4.
12. А. В. Пинаев. ПМТФ, 1981, 2.
13. А. В. Пинаев, А. И. Сычев. ФГВ, 1984, 20, 1.
14. Ю. А. Николаев, М. Е. Топчийн. ФГВ, 1977, 13, 3.
15. А. В. Пинаев, А. И. Сычев. ФГВ, 1982, 18, 6.
16. А. А. Васильев. Канд. дис. Новосибирск, 1977.
17. А. А. Васильев, Т. П. Гавриленко и др. ФГВ, 1972, 8, 1.
18. С. А. Ждан, В. И. Феденок. ФГВ, 1982, 18, 6.
19. D. H. Edwards, G. T. Williams, J. C. Breeze. J. Fluid Mech., 1959, 6, 4.

ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕТОНАЦИОННОГО ПРЕВРАЩЕНИЯ КОНДЕНСИРОВАННЫХ ВВ МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ

А. М. Ставер, А. П. Ершов, А. И. Лямкин
(Новосибирск)

Исследование состава продуктов детонации взрывчатых веществ представляет очевидный интерес. Знание химического состава позволяет проверять уравнения состояния продуктов детонации и расчеты детонационных свойств конденсированных ВВ. Прямой эксперимент в этой области до сих пор является трудной проблемой. Как правило, опыты проводятся в специальных калориметрических бомбах [1] после расширения продуктов детонации. В этих бомбах взрывается небольшое количество ВВ, размеры которого не обеспечивают получения предельных детонационных характеристик.

Известно также, что характеристики ВВ зависят от максимальной энергии, выделяемой во фронте детонации, и остаточной энергии, выделяемой в волне Тейлора. Небольшое изменение условий адиабатического расширения продуктов детонации (состав атмосферы, окружающей заряд ВВ, степень расширения) могут заметно изменять состав продуктов детонации. Прямые методы изучения состава в настоящее время не разработаны.

Важнейшим компонентом многих конденсированных взрывчатых веществ является углерод. В результате детонационного превращения он

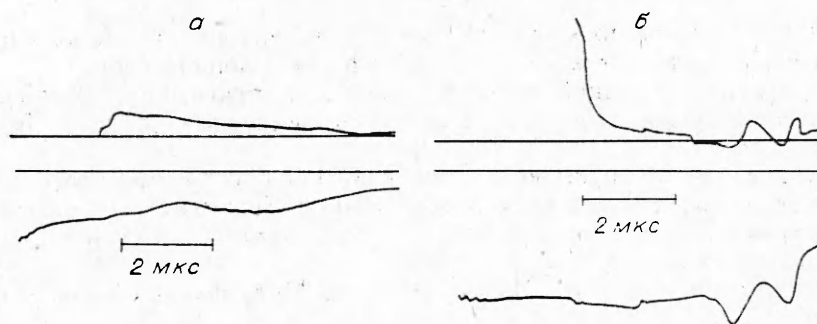


Рис. 1. Осциллограммы дифференциальных измерений электропроводности. Верхний луч — зависимость электропроводности от времени, нижний — напряжение на ячейке.
а) ТГ 80/20; б) ТГ 50/50.

может образовывать различные химические соединения, а также выделяться в свободном состоянии. С количеством выделяющегося углерода связываются детонационные характеристики ВВ [2], электропроводность [3], электрохимические потенциалы [4]. Следовательно, изучая физические характеристики продуктов детонации на различных стадиях разлета, можно получить сведения о химических превращениях в детонационных волнах и о составе компонентов, влияющих на эти характеристики.

В работе исследуется состояние продуктов детонации дифференциальным методом измерения электропроводности [5]. Сущность метода заключается в измерении тока через выделенный объем продуктов детонации в ячейке с полем, перпендикулярным градиенту электропроводности. Сигнал на осциллографе пропорционален электропроводности σ в определенном сечении заряда. Изменения σ во времени (или в пространстве, $\sigma = \sigma(x - Dt)$), могут нести некоторую информацию о кинетике образования продуктов детонации.

В качестве модельного вещества для исследования использовался тротил и сплавы тротила с гексогеном (ТГ). Тротил или сплав ТГ заливались в стальную толстостенную трубу с внешним диаметром 40, внутренним 10 мм и длиной 150 мм. По оси трубы размещался стальной электрод диаметром 1,5 мм. Заливка взрывчатого вещества производилась малыми порциями, чтобы избежать оседания гексогена и образования внутренних полостей при кристаллизации ВВ. Разрешение метода по оценкам, проведенным в [5], составляет 0,5 мм (0,07 мкс). Хотя тонкая структура зоны химической реакции не разрешалась, интересные нас явления имеют гораздо большие характерные масштабы.

Типичные осциллограммы приведены на рис. 1, а, б. На верхнем луче осциллографа регистрировалась электропроводность в зависимости от времени, на нижнем — напряжение на ячейке. Содержание тротила в смесях изменялось от 100 до 40%. Для различных составов по осциллограммам определялось время, за которое проводимость ПД уменьшалась в e раз. Анализ результатов измерений показывает, что в ТГ 80/20 спад электропроводности (см. рис. 1, а) за фронтом детонации выражен слабо. С увеличением содержания гексогена в смеси время спада τ_e уменьшается (см. рис. 1, б). Так, τ_e для ТГ 50/50 составляет 0,5 мкс. Это значит, что ширина проводящей области равна нескольким миллиметрам. Небольшие колебания напряжения на ячейке из-за неоднородности состава ВВ также свидетельствуют об узкой проводящей зоне. В случае существования широкой зоны колебания напряжения сглаживаются (см. рис. 1, а).

Результаты экспериментов сведены в таблицу, где приведены состав ВВ, σ_{\max} — максимальная электропроводность, τ_e — время спада электропроводности в e раз. Для некоторых ВВ указаны также значения скорости детонации D , давление в плоскости Чепмена — Жуге, содержание в продуктах детонации углерода и воды из [2] (в молях на моль ВВ).

ВВ	$\frac{\sigma_{\max}}{\text{Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}}$	τ_e , мкс	D , км/с	p , кбар	H ₂ O	C	R_b/R_u
ТНТ	3,8	5,0	7,0	183	2,5	5,15	0,80
ТГ 90/40	2,7	3,4	—	—	—	—	—
ТГ 80/20	2,0	2,7	—	—	—	—	—
ТГ 70/30	2,2	2,0	—	—	—	—	1,03
ТГ 60/40	2,3	0,6	—	—	—	—	0,98
ТГ 50/50	1,5	0,5	7,65	248	—	—	1,04
ТГ 40/60	1,9	0,22	—	—	—	—	1,20
ТГ 36/64	—	—	8,0	266	4,37	4,34	—

В отдельных интегральных экспериментах определялась зависимость сопротивления между центральным электродом и оболочкой от времени. Наблюдалось хорошее согласие с дифференциальной методикой. В последнем столбце таблицы указано отношение сопротивления заряда, вычисленного по осциллограмме электропроводности, к измеренному прямым способом. Из таблицы видно, что максимальная электропроводность зависит незначительно от состава вещества. В то же время содержание гексогена в смеси сильно влияет на τ_e . Например, для состава тротил — гексоген 90/10 $\tau_e \approx 3,4$ мкс, для состава 50/50 $\tau_e \approx 0,5$ мкс.

В настоящее время обсуждаются две основные гипотезы о природе электропроводности. Авторы [4, 6, 7] указывают на возможность значительного (иногда преобладающего) ионного компонента электропроводности при диссоциации части продуктов детонации (например, воды) в условиях высоких давлений и температур. Согласно [3, 8], в богатых углеродом веществах возможна термоэмиссия электронов с графитоподобных частиц.

Из таблицы видно, что с увеличением содержания гексогена в смеси растут давление и содержание воды. Следует отметить, что расчеты продуктов детонации недостаточно надежны, однако ясно, что общая тенденция (рост содержания воды и уменьшение содержания свободного углерода) отражены правильно. Таким образом, авторы не видят возможности согласовать наблюдаемый спад электропроводности с представлениями о равновесной ионной проводимости. Если следовать оценкам [4], диссоциация воды в равновесной зоне должна обеспечивать электропроводность порядка $1 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$, возрастающую с давлением. Расширение оболочек в экспериментах с различными составами тротил — гексоген происходит практически одинаково. Поэтому сильную зависимость времени спада электропроводности от состава не удастся объяснить расширением продуктов детонации и соответствующим падением ионной проводимости.

Рассмотрим наблюдаемые в эксперименте результаты с позиций термоэмиссии. Падение электропроводности по этому механизму объясняется уменьшением числа эмиттированных электронов. Это может происходить вследствие образования в продуктах детонации углеродных частиц с особыми свойствами, например, в плотной модификации. Даже составляя небольшую часть конденсированной фазы, такие частицы способны связывать электроны. С этих позиций экспериментальные осциллограммы дают информацию о кинетике процессов в зоне детонации. Характерные времена образования новой фазы, определенные по осциллограммам, составляют несколько десятых микросекунды.

Для проверки масштабного фактора проведены эксперименты по измерению электропроводности в центральной области заряда диаметром $d = 80$ мм. Применялась методика типа [8] — регистрация интегральной проводимости между двумя проволочками диаметром 1 мм, погруженными в заряд ВВ на длину 40 мм. При скольжении детонационной волны вдоль электродов изменение интегральной проводимости в зависимости от времени позволяет получить информацию о распределении

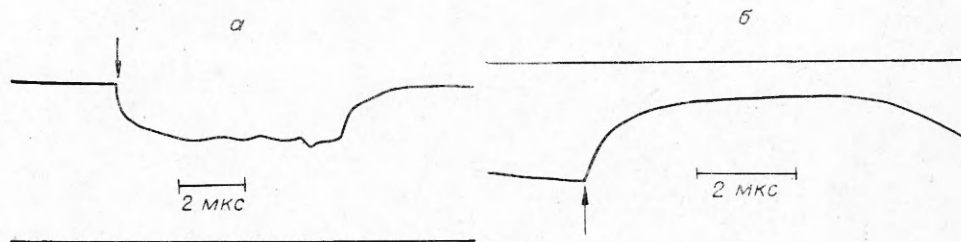


Рис. 2. Осциллограммы интегральных измерений электропроводности в зарядах ТГ 50/50. Стрелками отмечены моменты замыкания электродов детонационной волной. а) заряд $d=10$ мм в металлической оболочке; б) заряд $d=80$ мм.

электропроводности. Разрешение методики определяется растеканием тока и имеет порядок расстояния между электродами 5 мм. Для качественной проверки масштабного эффекта такое разрешение было достаточным. Применялась также методика [6] с отражением детонационной волны от тефлонового блока. Обе методики дали аналогичные результаты.

Экспериментальные осциллограммы интегральных измерений, демонстрирующие масштабный эффект, приведены на рис. 2 (а — заряд 1 диаметром 10 мм в металлической оболочке, б — заряд 2 диаметром 80 мм, ТГ 50/50). Стрелками показан момент замыкания электродов детонационной волной. Отклонение луча от нулевой линии тем меньше, чем больше проводимость между электродами.

Если в заряде 1 сопротивление быстро выходит на почти постоянный уровень и далее не меняется, то в заряде 2 уменьшение сопротивления происходит в течение более длительного времени. На рис. 3 приведен результат обчета осциллограмм: зависимость интегральной проводимости Y от толщины проводящей области x . Для заряда в оболочке зависимость $Y(x)$ согласуется с результатами дифференциальных измерений, характерная толщина проводящей зоны несколько миллиметров. В заряде 2 эффективная толщина проводящей области — около 1,5 см, т. е. на таких расстояниях от фронта детонации существует заметная электропроводность. На рис. 3 учтен геометрический фактор, так что при одинаковом распределении электропроводности кривые должны были бы совпадать.

Масштабный эффект наблюдался ранее и в других ВВ [6—8], причем его не удается объяснить образованием приэлектродных слоев или другими систематическими погрешностями. Наблюдаемая разница действительно указывает на различное распределение электропроводности.

Для рассматриваемого случая широкая проводящая область в зарядах 2 может свидетельствовать о существовании значительной ионной компоненты электропроводности, которая из-за большого диаметра спадает медленно и маскирует изменение термоэмиссионной составляющей. В зарядах малого диаметра вследствие более быстрого расширения продуктов детонации (несмотря на существование толстой металлической оболочки) ионный компонент, по-видимому, несуществен.

Таким образом, проведенные эксперименты указывают на неоднозначность механизма электропроводности и влияние на него химических и газодинамических процессов. Тем не менее, по нашему мнению, измерения электропроводности дают информацию о кинетике детонационного превращения.

Авторы выражают благодарность В. М. Титову за внимание к работе.

Поступила в редакцию 27/VII 1983

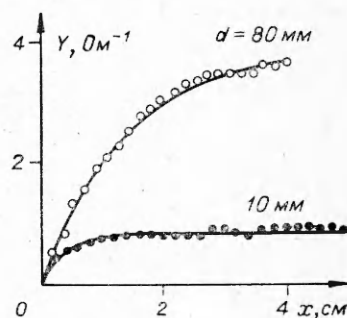


Рис. 3. Зависимость интегральной проводимости от толщины проводящей зоны.

ЛИТЕРАТУРА

1. Р. Макгайр, Д. Орнелъяс, И. Акт.— В кн.: Детонация и взрывчатые вещества. М.: Мир, 1981.
2. С. L. Mader. Numerical modeling of detonations. University of California press, Berkeley, Los Angeles — London, 1979.
3. А. П. Ершов. ФГВ, 1975, 11, 6, 938.
4. В. В. Якушев, А. И. Дремин. Докл. АН СССР, 1975, 221, 1143.
5. А. П. Ершов, П. И. Зубков, Л. А. Лукьянчиков. ФГВ, 1974, 16, 6, 864.
6. А. Г. Антипенко, А. Н. Дремин, В. В. Якушев. Докл. АН СССР, 1975, 225, 1086.
7. А. Г. Антипенко, В. В. Якушев.— В кн.: Детонация. Черноголовка, 1977.
8. А. П. Ершов, П. И. Зубков, Л. А. Лукьянчиков.— В кн.: Детонация. Черноголовка, 1977.

МЕТОД РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ ДЕТОНАЦИИ КОНДЕНСИРОВАННЫХ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ

А. Л. Кривченко

(Куйбышев)

Расчету скорости детонации посвящено значительное количество работ [1—6]. Предложенные методики расчета могут быть условно разделены на две группы: термодинамические [1—3] и классические [4—5]. Термодинамические методики основаны на нахождении той или иной зависимости скорости детонации от теплоты взрыва, состава продуктов детонации (ПД) и др. Классические основаны на решении системы уравнений из законов сохранения, условия Чепмена — Жуке и уравнения состояния в той или иной форме.

Как первые, так и вторые методики учитывают в основном лишь свойства ПД и не принимают во внимание тот факт, что фронт детонации (передняя граница зоны химической реакции) распространяется по непрореагировавшему ВВ и, следовательно, скорость детонации может быть в большой степени описана свойствами заряда ВВ.

В работе [6] в качестве дополнительного фактора, учитывающего свойства заряда, используется удельное число грамм-атомов в исходном ВВ. Однако данный фактор, хотя и учитывает химическую природу ВВ, не дает представлений о характере его физического влияния на параметры детонации.

Предположив, что из свойств заряда ВВ, связанных с распространением по нему детонационного фронта, в первую очередь влияние должны оказывать его волноводные свойства (такие, как скорость распространения звука), сделаем попытку провести оценку параметров детонации через данную характеристику и теплоту взрыва. Анализ скорости звука и скорости детонации позволяет установить некоторые закономерности их взаимосвязи. Например, нитрогуанидин и нитрат гидрозония, имеющие низкую теплоту взрыва (~ 800 ккал/кг) и высокую скорость звука (~ 3000 м/с) имеют высокую скорость детонации, а нитроглицерин, почти вдвое превосходящий по теплоте взрыва данные ВВ, но имеющий скорость звука ~ 1700 м/с, уступает им в скорости детонации.

Разделив влияние упругой и тепловой составляющих давления на скорость распространения фронта, можно выразить ее через суммарный волно-энергетический фактор. Волновую составляющую данного фактора характеризует скорость звука, а тепловую — энергосодержание в зоне химической реакции, определяющее массовую скорость.

Зависимость скорости распространения ударной волны от скорости звука и массовой скорости в виде обобщенной ударной адиабаты предложена в работе [7]:

$$D = 1,2c_0 + 1,7u_\phi,$$

где c_0 — скорость звука в исходном веществе; u_ϕ — массовая скорость на