

ударного фронта (которое собственно и обеспечивает развитие детонации [2, 19]) является следствием локальных разогревов, возникающих непосредственно в веществе, а присутствие пор, очевидно, способствует локальной диссипации энергии ударного сжатия, ведущей к образованию эффективных очагов разложения.

Поступила в редакцию
8/XII 1972

ЛИТЕРАТУРА

1. И. М. Воскобойников, В. М. Богомолов, А. Д. Марголин. Докл. АН СССР, 1966, **167**, 3.
2. А. Н. Дремин, С. А. Колдунов. Сб. «Взрывное дело», № 63/20. М., «Недра», 1967.
3. А. Н. Дремин, К. К. Шведов, О. С. Авдонин. ФГВ, 1970, **6**, 4.
4. А. Масек. Chem. Rev., 1962, **62**, 41.
5. Е. Бюрло. Детонация через влияние. Изд. Артакадемии, 1934.
6. Ф. А. Баум, К. П. Станюкович, Г. И. Шехтер. Физика взрыва, М., Физматгиз, 1959.
7. В. С. Илюхин, П. Ф. Похил. Докл. АН СССР, 1961, **140**, 1.
8. F. P. Bowden, H. T. Williams. Research, 1951, **4**, 7, 339.
9. Ф. Боуден, А. Иоффе. Быстрые реакции в твердых веществах. М., ИЛ, 1962.
10. T. L. Gottrell, J. G. Gibs. Nature, 1956, **178**, 814.
11. G. E. Seay, L. B. Seely. J. Appl. Phys., 1961, **32**, 6.
12. M. C. Chick. 4-th Symposium (International) on Detonation, 1953, p. 349.
13. W. W. Marshall. 5-th Symposium (International) on Detonation, 1955, p. 157.
14. G. P. Sachia, E. G. Whitbread. Proc. Roy. Soc., 1958, **A246**, 268.
15. Н. Б. Варгафтик. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. М., Физматгиз, 1966.
16. Ю. Н. Рябинин. Газы при больших плотностях и высоких температурах. М., Физматгиз, 1959.
17. У. И. Гольдшлегер, К. П. Прибыткова, В. В. Барзыкин. ФГВ, 1973, **9**, 1.
18. А. Э. Аверсон, В. В. Барзыкин, А. Г. Мержанов. ИФЖ, 1965, **IX**, 2.
19. А. Н. Дремин, С. А. Колдунов, К. К. Шведов. ФГВ, 1971, **8**, 1.

УДК 622.215.1

К ВОПРОСУ О СТРУКТУРЕ ДЕТОНАЦИОННЫХ ВОЛН В МАЛОПЛОТНЫХ ЗАРЯДАХ КОНДЕНСИРОВАННЫХ ВВ

В. Г. Хотин, В. А. Пономарев
(Москва)

При стационарном распространении детонации гидродинамическая теория [1] предсказывает наличие за ударным фронтом зоны повышенного давления — химпика в области химической реакции, и следующей за ним области относительно медленного изменения параметров под воздействием волны разгрузки. В трехмерном случае распределение параметров по длине заряда в детонационной волне значительно усложняется, так как приходится учитывать влияние боковых волн разгрузки.

Наиболее простой вариант схемы гидродинамических течений за фронтом детонационной волны был предложен в [2] и получил дальнейшее развитие в [3] (так называемая геометрическая модель). Согласно этой модели, за плоским детонационным фронтом должна существовать

область с повышенными параметрами, не охваченная боковыми волнами разгрузки. Размеры этой области определяют возможность протекания химической реакции.

Модель, предложенная в работах Джонса [4], а в последнее время обсуждавшаяся в работах Дремина и Трофимова [5], существенно отличается от изложенной выше. Предполагается, что при отсутствии оболочки газы из наружных слоев заряда движутся вдоль линий тока, определяемых решением Майера для обтекания угла, тогда как продукты взрыва внутренних слоев расширяются при постоянном давлении в поперечном сечении.

Обе модели [6] показали, что фронт детонации в конденсированных ВВ не плоский, а неизбежно искривлен, и что распределение параметров (давления, массовой скорости и т. д.) среды за фронтом детонационной волны происходит различно.

В настоящей работе предпринята попытка экспериментально изучить распределение параметров за фронтом детонационной волны. Объектом исследования явилась смесь 15%-ного мелкодисперсного гексогена с хлористым натрием (размер частиц 0,2—0,4 мм). Заряды диаметром 20 и 35 мм и длиной $3,5d$ составлялись из трех шашек с плотностью $1,3 \text{ г/см}^3$ и имели оболочку из ацетатной пленки толщиной 0,2 мм. Детонация возбуждалась генератором плоских ударных волн — конической линзой из гексогена с плотностью $1,0 \text{ г/см}^3$, которая, в свою очередь, инициировалась азидной каплей. Электромагнитным методом определялись параметры детонационной волны по оси заряда, на его периферии и в промежуточном положении. Длина рабочей поверхности датчика 5 мм.

В каждом положении сделано 4 параллельных опыта. На рис. 1 и 2 приведены характерные осциллограммы записи массовой скорости продуктов взрыва в трех указанных выше точках в зарядах диаметром 20 и 35 мм. Изменение массовой скорости качественно подобно изменению давления за фронтом детонационной волны.

Полученные таким образом профили детонационной волны имеют ряд особенностей. Во всех случаях фиксируется волна-предшественник с давлением не более 0,2 кбар, протяженностью 0,2—0,3 мм. Затем сле-

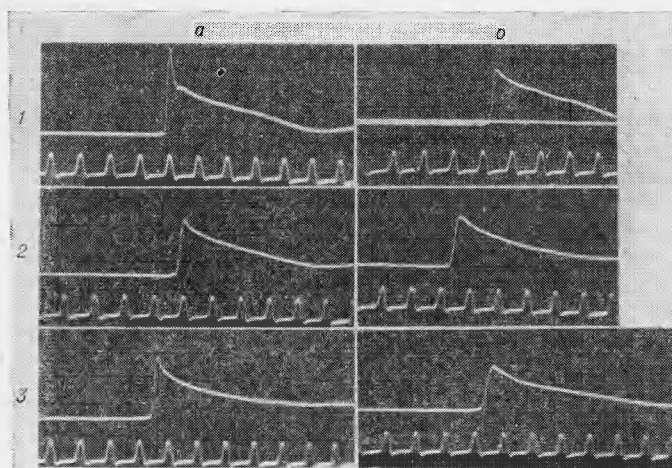


Рис. 1. Осциллограммы записи массовой скорости продуктов взрыва при максимальном (а) и минимальном (б) ее значении в заряде с $d=20$ мм, $\Delta\tau=1$ мкс.

Расположение датчиков: 1 — по оси заряда; 2 — в промежуточном положении; 3 — на периферии.

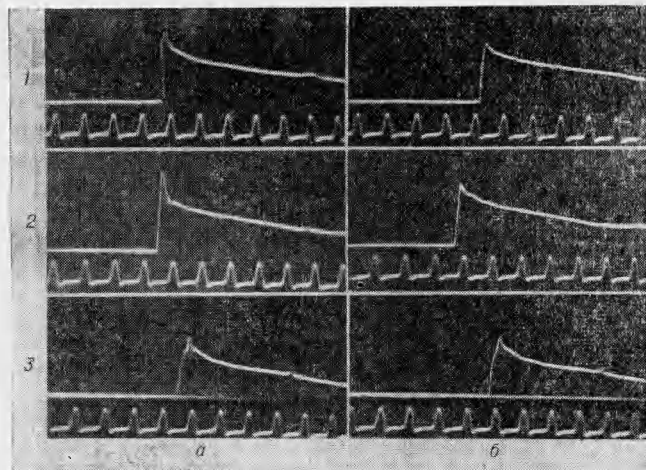


Рис. 2. Осциллограммы записи массовой скорости продуктов взрыва при максимальном (а) и минимальном (б) ее значении в заряде с $d=35$ мм.
Обозначения см. на рис. 1.

дует сравнительно быстрое повышение давления на фронте детонационной волны, более или менее ярко выраженный химпик и медленное падение давления в волне разгрузки. Зафиксировано резкое изменение массовой скорости, а следовательно, и давления в зоне химпика от опыта к опыту, значительно превышающее естественную погрешность регистрирующей системы. Так, например, по оси заряда давление колеблется от 10 до 20 кбар, т. е. почти в 2 раза. Амплитуда колебания давления в точках, расположенных на периферии заряда, меньше.

Несмотря на значительное колебание давления в зоне химпика по оси заряда, давление в плоскости Чепмена-Жуге по всему сечению заряда остается примерно постоянным и равным 10 кбар.

Во всех опытах осуществлялась регистрация скорости распространения детонации с помощью СФР. Несмотря на существенное колебание массовой скорости продуктов взрыва в зоне химпика по оси заряда, скорость распространения зоны свечения по периферии заряда и яркость свечения по всей его длине оставались постоянными. Скорость детонации не зависела от диаметра заряда и была равна 2100 м/с.

Электромагнитным методом определено запаздывание детонационной волны на периферии заряда по отношению к его оси. Отношение радиуса кривизны фронта детонации (R_m) к диаметру заряда (d) на расстоянии $3,5d$ от места инициирования оказалось равным 3,2 и 2,9 для 20 и 35 мм зарядов соответственно, что находится в пределах, указанных Куком для идеальной детонации.

Сопоставление профилей детонационных волн с максимальными и минимальными параметрами позволило построить изобары, характеризующие распределение давления за фронтом детонационной волны в период максимальной и минимальной пульсации в зоне химпика. В период максимальной пульсации по оси заряда диаметром 20 мм (рис. 3) наблюдается ограниченная область (глубиной 0,3 мм и шириной около 5 мм), давление в которой превышает 15 кбар. Область с давлением более 10 кбар при малой глубине (0,4 мм) распространяется на все поперечное сечение заряда. Ее границы совпадают с границами зоны химической реакции. Далее давление по всему сечению заряда медленно падает и на удалении 3,5 мм от детонационного фронта достигает 5 кбар. В период, когда параметры среды в зоне химпика имеют минимальное значение, область с давлением выше 15 кбар отсутствует, область с дав-

лением выше 10 кбар сокращается до 8 мм, а область с давлением от 10 до 5 кбар изменяется в меньшей степени.

Резкого изменения параметров среды за фронтом детонационной волны под влиянием боковых волн разгрузки не обнаружено.

В зарядах диаметром 35 мм качественная картина взаимного расположения изобар за фронтом детонационной волны остается без изменения (рис. 4), но в период максимальной пульсации ширина зоны с высоким давлением (выше 15 кбар) возрастает до 25 мм при той же глубине, что и в опытах с зарядами диаметром 20 мм. В период минимальной пульсации зона с повышенным давлением также отсутствует.

Таким образом, эксперимент указывает на сложную и переменную во времени картину распределения давления за фронтом детонационной волны, даже в случае идеального режима детонации. Можно полагать, что переменное давление в зоне химической реакции при стационарном распространении детонации является характерной особенностью порошкообразных ВВ и связана с механизмом инициирования химической реакции. Наиболее реальным механизмом возбуждения химического превращения в ударных волнах столь малой интенсивности, распространяющихся со скоростью 2100 м/с, является возникновение горячих точек за счет пластической деформации частичек порошка. Считая, что изменение тепловой доли внутренней энергии пористого образца равно полному приращению удельной внутренней энергии, и полагая среднюю тепло-

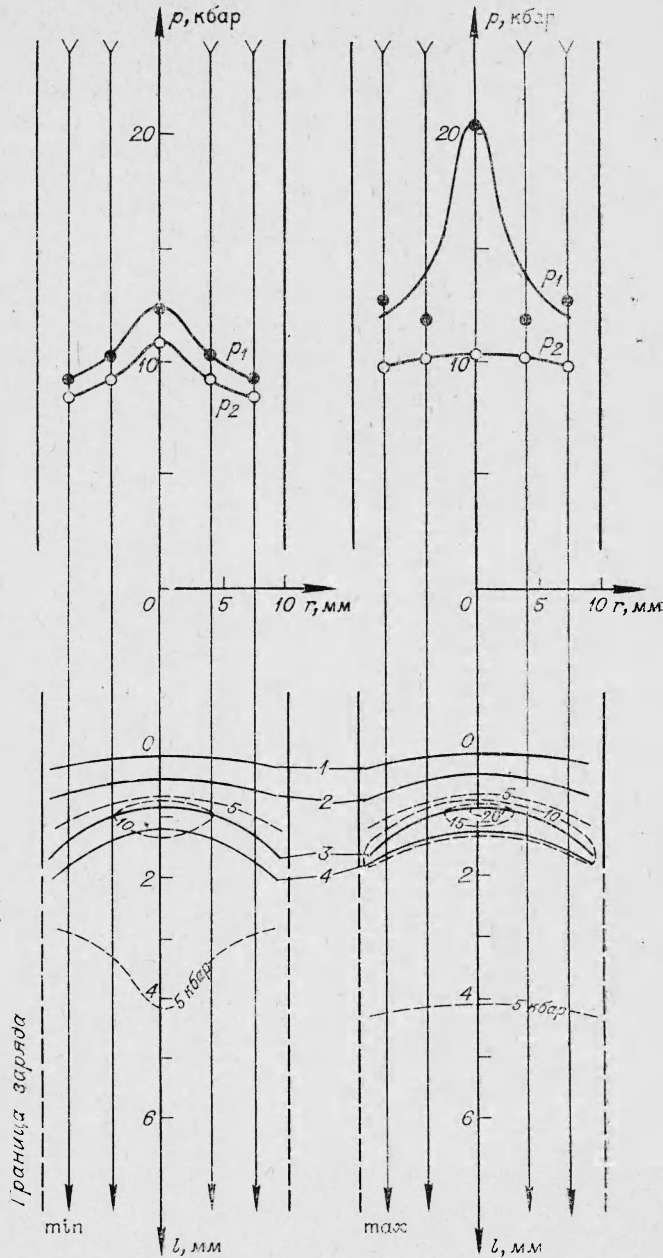


Рис. 3. Структура фронта идеальной детонации в заряде: с $d=20$ мм, p_1 — давление на вершине химика, p_2 — давление в плоскости Чепмена-Жуге.

1 — фронт волны-предшественника; 2 — начало подъема давления в детонационной волне; 3 — положение вершины химика; 4 — положение поверхности Чепмена-Жуге; стрелками указаны предполагаемые траектории датчиков.

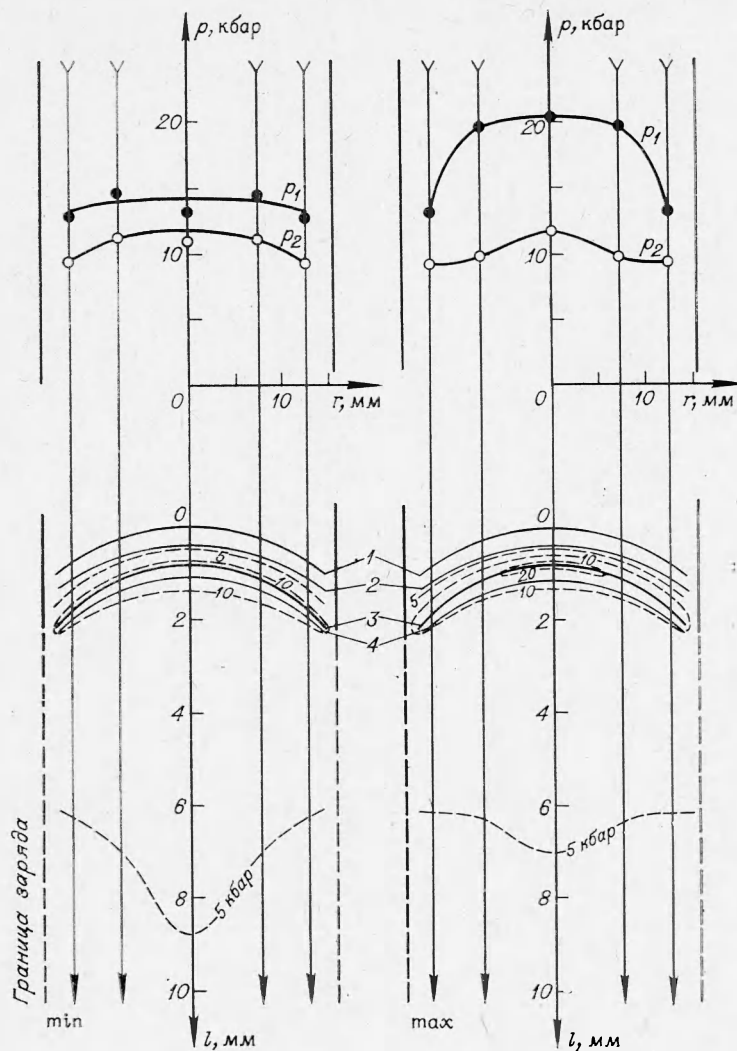


Рис. 4. Структура фронта идеальной детонации в заряде диаметром 35 мм.
Обозначения см. на рис. 3.

емкость смеси равной 0,5 кал/г·град, можно показать, что разогрев твердой фазы при ударном сжатии не превышает 150° С. Разогрев газовых включений несуществен. Вакуумирование зарядов до остаточного давления 1 мм рт. ст. не повлияло на скорость распространения и параметры детонационной волны.

Под воздействием ударной волны в уплотняемом слое порошкообразного ВВ возникают два конкурирующих процесса: возникновение очагов химической реакции с последующим распространением горения на большую поверхность и уплотнение порошкообразного ВВ, препятствующее распространению горения. Резкое повышение давления приводит к повышению плотности слоя ВВ, подготавливаемого к реакции и, как следствие этого, к срыву воспламенения. Следующее за этим снижение давления за счет уменьшения полноты химического превращения создает более благоприятные условия для протекания химической реакции. В последующем процесс повторяется.

Переменное значение массовой скорости в зоне химика не противоречит условию постоянства скорости распространения детонации, так как уравнению прямой Михельсона удовлетворяет любое значение массовой скорости. Но отсюда следует, что уплотнение порошкообразного ВВ во фронте детонационной волны протекает не по ударной адиабате, а ввиду больших потерь энергии на дробление, пластическую деформацию и трение между частицами по кривой, вид которой определяется давлением в детонационной волне.

Изложенные экспериментальные результаты позволяют прийти к следующему заключению:

1. Фронт идеальной детонации в смесях типа сенсibilизатор + инертный наполнитель является сферой с большим и постоянным радиусом кривизны $R_m/d \approx 3$, т. е. в первом приближении плоским.

2. При распространении детонации в порошкообразном малоплотном ВВ со скоростью меньшей, чем скорость звука в монокристалле, перед детонационной волной наблюдается волна-предшественник, протяженность которой определяется размерами неоднородностей.

3. Зона химической реакции следует непосредственно за детонационным фронтом и ее глубина в рассматриваемом случае не превышает 1 мм.

4. В зоне химической реакции наблюдается область с резко повышенным переменным значением давления и массовой скорости продуктов детонации, расположенная у оси заряда.

5. Существенное (в два раза) изменение давления в зоне химической реакции оказывает малое влияние на параметры среды в плоскости Чепмена-Жуге. Резкого изменения параметров среды за плоскостью Чепмена-Жуге под влиянием боковых волн разгрузки не обнаружено.

6. В целом распределение параметров за фронтом детонационной волны в изученных системах находится в лучшем соответствии с моделью Джонса.

*Поступила в редакцию
19/IX 1972*

ЛИТЕРАТУРА

1. Я. Б. Зельдович, А. С. Компанеев. Теория детонации. М., Гостехиздат, 1955.
2. Ю. Б. Харитон. Сб. «Вопросы теории взрывчатых веществ». М., Изд-во АН СССР, 1947.
3. Melvyn. A. Cook. The Science of High Explosives. London, Reinhold publ. Corp., 1958.
4. H. Jones. Proc. Roy. Soc., 1947, A189, 415.
5. А. Н. Дремин, С. Д. Савров, В. С. Трофимов, К. К. Шведов. Детонационные волны в конденсированных средах. М., «Наука», 1970.
6. В. С. Трофимов, А. Н. Дремин. ФГВ, 1971, 7, 3.

УДК 662.215.1

УСЛОВИЕ ЧЕПМЕНА-ЖУГЕ ДЛЯ РЕАЛЬНЫХ ДЕТОНАЦИОННЫХ ВОЛН

*А. А. Васильев, Т. П. Гавриленко, М. Е. Топчиян
(Новосибирск)*

Практически во всех работах, посвященных измерению газодинамических параметров в продуктах детонации, обнаружено заметное отклонение их от рассчитанных по одномерной теории. Экспериментаторы,