

ЛИТЕРАТУРА

1. Андреев В.В., Лукьянчиков Л.А. К механизму распространения детонации с малой скоростью в порошковом тэне — при искровом инициировании // *ФГВ.* — 1974. — 10, № 6. — С. 912—919.
2. Андреев В.В., Ершов А.П., Лукьянчиков Л.А. Двухфазная низкоскоростная детонация пористого ВВ // Там же. — 1984. — 20, № 3. — С. 89—93.
3. Бойко М.М., Крамаренко В.Н., Соловьев В.С. Особенности детонации низкоплотных ВВ с открытой пористостью // *Детонация: Материалы V Всесоюз. симп. по горению и взрыву.* — Черноголовка, 1977. — С. 58—62.
4. Мамонтов Г.М., Митрофанов В.В., Субботин В.А. Режимы детонации газовой смеси в жесткой пористой среде // *Детонация: Материалы VI Всесоюз. симп. по горению и взрыву.* — Черноголовка, 1980. — С. 106—110.
5. Лямин Г.А. Гетерогенная детонация в жесткой пористой среде // *ФГВ.* — 1984. — 20, № 6. — С. 134—138.
6. Пинаев А.В., Лямин Г.А. К структуре газопеночной и газовой детонации в инертной пористой среде // *ФГВ.* — 1992. — 28, № 5. — С. 97—102.
7. Пинаев А.В., Лямин Г.А. Низкоскоростная детонация ВВ в вакуумированной пористой среде // *Докл. АН.* — 1992. — 325, № 3. — С. 498—501.
8. Frish U., Hasslacher B., Pomeau Y. Lattice — Gas Automata for the Navier—Stokes Equation // *Phys. Rev. Letters.* — 1986. — 56, № 14. — P. 1505—1508.
9. Ершов А.П. Детонация в релаксирующем газе // *ФГВ.* — 1989. — 25, № 2. — С. 112—116.
10. Ермолаев Б.С., Хасанов Б.А., Борисов А.А. и др. К теории стационарного конвективного горения // Там же. — 1977. — 13, № 2. — С. 169—176.
11. Proc. NATO workshop on lattice gas methods for PDE's: theory, applications and hardware // *Physica D.* — 1991. — 47. — P. 299—337.
12. Wolfram S. Cellular Automaton Fluids 1: Basic Theory // *J. Stat. Phys.* — 1986. — 45, N 3/4. — P. 471—526.
13. Ершов А.П. Газодинамика клеточных автоматов // *ФГВ.* — 1994. — 30, № 1. — С. 107—117.
14. Митрофанов В.В. Некоторые критические явления в детонации, связанные с потерями импульса // *ФГВ.* — 1983. — 19, № 4. — С. 169—174.

630090, г. Новосибирск,
ИГиЛ СО РАН

Поступила в редакцию 16/VII 1993,
после доработки — 19/X 1993

УДК 662.215.1

А.П. Ершов, П.И. Иванов, В.В. Андреев

ДЕТОНАЦИЯ СИЛЬНОРАЗБАВЛЕННОГО ВВ

Экспериментально исследована детонация смесей тэна с кварцевым песком при содержании ВВ 10—30 %. Такие системы характерны малыми давлением и скоростью детонации. Электромагнитным методом измерялись массовые скорости твердого наполнителя и газа продуктов детонации. При содержании ВВ более 15 % процесс ведется лидирующей ударной волной и в целом односкоростной. При малом содержании ВВ существенны эффекты двухфазности. Дается оценка граничной концентрации.

В работе рассматриваются низкоскоростные режимы детонации смеси ВВ—инертная добавка. Если в области малого содержания добавок проведены систематические исследования и имеется обширная литература, то сильноразбавленные системы пока изучены сравнительно мало. Между тем детонация таких систем представляет определенный интерес с точки зрения физики процесса: здесь можно ожидать существенно двухфазных режимов детонации, которые в последнее время широко исследуются. С другой стороны, уменьшение содержания ВВ приводит к снижению давления и скорости детонации и, следовательно, бризантного воздействия. Поэтому такие смеси могут найти применение в случаях, когда требуется сравнительно «мягкое» воздействие на материал.

В работах [1—3], посвященных исследованию детонации при сильном разбавлении, обнаружены стандартные режимы с лидирующей ударной волной (УВ) и более или менее выраженным химпиком.

© А.П. Ершов, П.И. Иванов, В.В. Андреев, 1994.

Другое мнение высказывается в [4], где исследовались смеси гексогена с мипорой с начальными плотностями $\rho_0 = 0,2 \div 1,0 \text{ г/см}^3$. Измерялись скорость детонации и массовая скорость. При минимальной плотности получена скорость детонации 2,4 км/с, что соответствует давлению в плоскости Чепмена — Жуге 5 кбар. Авторы [4] считают, что в таких режимах реакция протекает в основном в виде взрывного горения зерен ВВ с поверхности. Вещество переходит из исходного состояния в состояние, соответствующее окончанию реакции, не через скачок параметров, а в результате постепенного их нарастания, связанного с последовательным выгоранием ВВ.

Подобные же выводы получены при исследовании неидеальных режимов детонации в пористом ВВ [5—7]. Например, в насыпном тэне при малых диаметрах заряда (3—4 мм) можно возбудить детонационный двухфазный процесс, который распространяется по режиму струйного горения со скоростью 1—1,5 км/с. Сходство с разбавленными системами в том, что выгорает, по оценкам, несколько процентов вещества [7], остальная же часть не участвует в реакции. (Однако при диаметрах заряда больше 4 мм процесс ускоряется и переходит в нормальный ($\approx 5 \text{ км/с}$) режим, который ведется УВ.)

Большой интерес представляет работа [8], где исследована детонация малоплотного ВВ в стесненных условиях. Насыпка из жестких стальных шариков образовывала пористый каркас. На поверхность шариков нанесен мелкодисперсный порошок ВВ. После инициирования взрывом газовой смеси в такой системе возникает волна с плавным ростом давления и неплоским фронтом. Также указывается, что распространение волны ведется вырывающимися вперед струями продуктов горения.

В настоящей работе изложены результаты экспериментов, проведенных в 1983—1984 гг. Исследовалась детонация системы тэн — кварцевый песок при содержании ВВ 10—30 %. Детонация, как и в работах [5—7], возбуждалась электрическим разрядом.

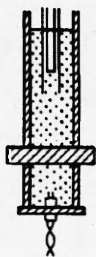
Методика эксперимента

Размер зерна песка составлял $\delta = 90 \div 700 \text{ мкм}$. Песок промывался в ацетоне, высушивался и просеивался. Использовался мелкодисперсный тэн, получаемый из раствора в ацетоне добавлением воды, отчего растворимость тэна резко падает [9]. Мелкодисперсный тэн представлял собой игольчатые кристаллы длиной ~ 50 и толщиной $\sim 10 \text{ мкм}$. Система нужной концентрации готовилась тщательным перемешиванием ВВ и наполнителя. Связь частиц ВВ с зернами песка была достаточно устойчивой и допускала насыпное зарядание без заметного расслаивания. При содержании ВВ $\beta = 20 \div 25 \%$ фоторазвертки детонации не выявили колебаний скорости фронта, а съемка выхода детонации на торец заряда демонстрирует однородный фронт свечения (с точностью до размера пор), радиус кривизны которого около 2 диаметров заряда.

Измерялись скорость детонации D и массовая скорость. Результаты измерений усреднялись по 2—3 опытам. Скорость детонации измерялась оптическим методом, а также электроконтактным вместе с массовой скоростью. Изучалось влияние размера зерен песка, диаметра заряда d и процентного содержания ВВ β . В опытах $d = 4 \div 32 \text{ мм}$. Применялись оболочки из оргстекла, стекла и винипласта. Заметного влияния материала оболочки в опытах не отмечено. Далее размеры оболочки обозначаются в виде дроби: внешний диаметр/внутренний диаметр (в миллиметрах).

Аналогично [10], для увеличения сигнала электромагнитного датчика массовой скорости использовалась импульсная катушка Гельмгольца. Этот способ оказался удобным, особенно при возбуждении процесса электрическим разрядом. Катушка представляла собой два кольца по 5 витков медного провода диаметром 1 мм, расстояние между кольцами 5, диаметр колец 10 см. Ток в катушке (1,5—5,5 кА) создавался разрядом конденсатора емкостью 100 мкФ, заряженного до напряжения 1—3 кВ. Расчетное поле в

Рис. 1. Конструкция заряда и расположение датчиков.



катушке совпадало с экспериментом с точностью $\approx 5\%$. Неравномерность поля в измерительной области $\approx 6\%$. Массовая скорость измерялась вблизи максимума магнитного поля, время до которого составляло ≈ 54 мкс. Напряженность поля H в максимуме достигала ≈ 6 кЭ.

В качестве датчика массовой скорости частиц наполнителя (песка) и использовалась рамка из алюминиевой фольги шириной 1 и толщиной 0,07 мм, к концам которой приваривались медные выводы. В двухфазной системе возможно относительное движение твердой и газовой фаз, и плечо рамки движется, вообще говоря, со скоростью, промежуточной между u и скоростью газа v . Однако из-за малого содержания ВВ эта средняя скорость ближе к u . Давление в условиях наших опытов практически определяется скоростью плеча датчика. Оценка влияния различия скоростей приведена в следующем разделе.

Для измерения v применялся разомкнутый датчик: два отрезка медной проволоки диаметром 0,5 мм, параллельных оси заряда. Базовое расстояние между ними составляло 0,5 см. Сопротивление продуктов детонации между этими контактами $R \approx 250$ Ом. Поскольку это сопротивление не постоянно, сигнал снимался в режиме холостого хода через большое балластное сопротивление, что уменьшало амплитуду более чем на порядок. В частности, по этой причине и потребовалось магнитное поле большой напряженности.

В момент прихода детонационной волны на разомкнутые электроды датчика появлялся сигнал даже при отсутствии магнитного поля (по-видимому, из-за влияния иницирующего разряда). От этого сигнала удалось избавиться, передавая детонацию через пластину из оргстекла (≈ 3 мм), изолирующую продукты детонации от цепи подрыва. Установлено, что при не слишком малых разбавлениях изолирующая прокладка заметно не влияет на процесс, так как величины u и D существенно не изменялись. О том же говорят данные фоторегистрации, описанные ниже. При $\beta \sim 10\%$ детонация не передавалась, поэтому содержание ВВ в иницирующей части повышалось до 20—25 %.

Ниже или выше по течению разомкнутого датчика ставилась алюминиевая рамка, что позволило в одном эксперименте определять массовые скорости газа и скелета, а также D (по интервалу между сигналами). Схема опыта приводится на рис. 1. По сигналу с алюминиевой рамки оценивалась ошибка, вносимая производной dH/dt в момент измерений. Предварительно снимался сигнал с датчика v , замкнутого провололочкой, для определения его эффективной площади. Задержка подрыва подбиралась так, чтобы при $dH/dt = 0$ начинал работать датчик скорости газа. В целом ошибка из-за dH/dt мала.

Проведены контрольные опыты с чистыми тэном и гексогеном насыпной плотности в зарядах 21,5/18. Получено удовлетворительное совпадение с известными данными. Например, для тэна давление $p = 64,5$ кбар в [11] и 68,8 кбар в эксперименте. Пиковое значение сигнала с П-образного датчика было на 20—25 % выше, чем с разомкнутого датчика, так как последний усредняет скорость вещества в проводящей зоне. Средняя скорость, естественно, ниже максимальной в ударной волне с химпиком.

Анализ электромагнитных измерений

Здесь рассматриваются только чисто двухскоростные эффекты без обсуждения влияния конечного диаметра заряда, ускорения плеча датчика и т.п. Различие скоростей фаз вносит дополнительную неопределенность в процесс измерения. В общем случае кроме показаний датчика необходимы дополнительные предположения о характере его взаимодействия с обеими фазами.

В данной работе, однако, рассмотрен случай сильного разбавления ВВ, т.е. малой массовой концентрации газовой фазы (продуктов детонации), когда можно ожидать, что скорость плеча рамки близка к скорости основной составляющей среды — инертного наполнителя. Вопрос о точности электромагнитных измерений распадается на два: во-первых, какова ошибка отношения измеренной скорости к скорости твердой фазы u и, во-вторых, как следует определять давление.

Оценим эффекты, возникающие из-за двухфазности. Законы сохранения массы и импульса для одномерного стационарного процесса имеют вид

$$\begin{aligned}\rho_{\alpha}\alpha_0 D &= \rho_s \alpha (D - u), \\ \rho_0 \varphi_0 D &= \rho_G \varphi (D - v), \\ \rho_0 + \rho_{\alpha}\alpha_0 D^2 + \rho_0 \varphi_0 D^2 &= p + \rho_s \alpha (D - u)^2 + \rho_G \varphi (D - v)^2.\end{aligned}\quad (1)$$

Здесь ρ_{α} и ρ_s — начальная и конечная истинные плотности инертной добавки; α_0 и α — начальная и конечная объемные доли добавки; ρ_0 — начальная средняя по порам плотность ВВ; ρ_G — конечная плотность продуктов детонации; φ_0 и φ — начальная и конечная объемные доли пор. Под порами подразумевается все пространство, свободное от инертного компонента, т.е. $\alpha + \varphi = 1$. После элементарных преобразований из (1) получим

$$p - p_0 = \rho_{\alpha}\alpha_0 Du + \rho_0 \varphi_0 Dv. \quad (2)$$

Введем плотность смеси $\rho = \rho_s \alpha + \rho_G \varphi$ и среднемассовую скорость $w = (\rho_s \alpha u + \rho_G \varphi v) / \rho$. Выражения u и v через w и параметр неравновесности $Z = v - u$ имеют вид

$$u = w - \frac{\rho_G \varphi}{\rho} Z, \quad v = w + \frac{\rho_s \alpha}{\rho} Z.$$

Поскольку $\rho_G \varphi \ll \rho$, $w \approx u$ даже при заметной разнице скоростей фаз ($Z \sim w$).

Преобразуя (2) к переменным w и Z , имеем

$$p - p_0 = \rho_n Dw - \frac{\rho_G \varphi \rho_s \alpha}{\rho} Z^2. \quad (3)$$

Здесь $\rho_n = \rho_{\alpha}\alpha_0 + \rho_0 \varphi_0$ — начальная плотность смеси. Выражение (3) заменяет обычную связь давления и скорости. Второе слагаемое в (3) представляет собой поправку, относительный вклад которой порядка $(\rho_G \varphi / \rho) (Z^2 / Dw)$. При $Z \leq w$ множитель Z^2 / Dw вносит дополнительную малость порядка сжатия в волне $\Delta \rho / \rho$. Таким образом, среднемассовая скорость будет наилучшей заменой скорости однофазной среды в смысле сохранения приблизительной пропорциональности между $p - p_0$ и w .

К сожалению, измеряемая скорость плеча датчика w_p вовсе не обязана совпадать с w , поэтому предыдущие вычисления имели иллюстративный характер. Более естественно принять, что взаимодействие датчика с продуктами детонации и с инертной добавкой определяется динамическим напором каждой фазы. Тогда, w_p находится из равновесия сил:

$$\rho_s \alpha (w_p - u)^2 = \rho_G \varphi (v - w_p)^2,$$

откуда $w_p = (u\sqrt{\rho_s \alpha} + v\sqrt{\rho_G \varphi}) / (\sqrt{\rho_s \alpha} + \sqrt{\rho_G \varphi})$. Ошибка

$$w_p - u = \frac{Z\sqrt{\rho_G \varphi}}{\sqrt{\rho_G \varphi} + \sqrt{\rho_s \alpha}} = \frac{\sqrt{x}}{1 + \sqrt{x}} Z,$$

где $x = \rho_G \varphi / \rho_s \alpha$. При $\beta = 25\%$ $x \approx 1/3$, $\sqrt{x} / (1 + \sqrt{x}) \approx 0,37$. Поскольку малый параметр x входит под корнем, отклонение, вообще говоря, не мало, и скорее можно говорить о качественной близости сигналов w_p и u . В этом смысле далее и будет говориться об измерении u .

Выражая скорости через переменные w_p и Z , из (2) имеем

$$p - p_0 = \rho_n D w_p - \frac{\sqrt{x}(1 - \sqrt{x})}{1 + \sqrt{x}} \rho_s \alpha (D - w_p) Z - \frac{2\rho_s \varphi Z^2}{(1 + \sqrt{x})^2}. \quad (4)$$

Второе слагаемое в правой части (4) появилось из-за отличия w_p от средне-массовой скорости. Размерный множитель в этой поправке того же порядка, что и основной (первый) член, однако численный коэффициент невелик. Выражение $\sqrt{x}(1 - \sqrt{x})/(1 + \sqrt{x})$ имеет максимум $(\sqrt{2} - 1)^2 \approx 0,17$ при $x \approx 0,17$. Третье слагаемое в (4) несколько больше уже обсуждавшейся поправки в (3). Таким образом, в условиях данных экспериментов $p - p_0 \approx \rho_n D w_p$, и ошибка из-за различия скоростей фаз находится на приемлемом уровне $\approx 20\%$. Эта оценка сохраняется при различных коэффициентах взаимодействия рамки с обеими фазами и улучшается, если учесть, что заметная двухфазность наблюдалась только при максимальных разбавлениях (см. ниже).

Экспериментальные результаты и обсуждение

С увеличением диаметра заряда скорость детонации растет. Так, для зарядов в трубках $6,5/4$ $D \approx 1900$ м/с, а для зарядов в трубках $21,5/18$ $D \approx 2300$ м/с при $\beta = 20\%$. В зарядах одинакового диаметра при сохранении дисперсности тэна и при увеличении размера зерен песка D возрастает (рис. 2). Большое влияние на развитие детонации оказывает дисперсность ВВ. Так, в зарядах с крупнодисперсным тэном (размер зерен тэна ~ 700 мкм, $315 < \delta < 700$ мкм) детонация затухала при всех диаметрах даже при $\beta = 60\%$. При уменьшении дисперсности тэна детонация нормально развивалась в зарядах большого диаметра и затухала при малых диаметрах. Так, при $\beta = 25\%$ наблюдалось нормальное развитие детонации при всех диаметрах зарядов, при $\beta = 15\%$ детонировали заряды $14,9/12,7$ и больших диаметров, при $\beta = 10\%$ — заряды $21,5/18$ и выше. При содержании $7,5\%$ детонация в зарядах $21,5/18$ затухала.

При малых β замечена линейная зависимость скорости детонации от удельной плотности ВВ ρ_y (рис. 2). Экспериментальные данные описываются прямой $D = 5,6\rho_y + 0,8$ (D в км/с, ρ_y в граммах ВВ на 1 см^3 смеси).

Характерные профили скорости твердой фазы u показаны на рис. 3. Наблюдается заметный разброс. В одной серии с оболочкой $21,5/18$ при $\beta = 25\%$ максимальное значение $u = 420 \div 590$ м/с. Естественно, массовая скорость более чувствительна к неоднородностям заряда, чем данные фоторегистрации. Величина u зависит от d и β . Например, при $\beta = 10\%$ u уменьшалась до 290 м/с.

Давления во фронте детонационной волны изменялись от $6,9 \pm 1,2$ кбар для оболочек $21,5/18$ с $\beta = 10\%$ до $15,3 \pm 2,5$ кбар для оболочек $43/32$ и $\beta = 25\%$ (см. рис. 2).

При большом содержании ВВ двухфазность системы не сказывается в качественном смысле. Так, в опытах по измерению массовой скорости газа

v для оболочек $21,5/18$ при $\beta = 25\%$ $v = 400 \pm 100$ м/с. Измерение скорости частиц песка П-образным датчиком дает $u = 520 \pm 100$ м/с. По существу, из-за сложной геометрии растекания тока, а также из-за больших флуктуаций значение v — оценка. Тем не менее можно утверждать, что скорость газа не превы-

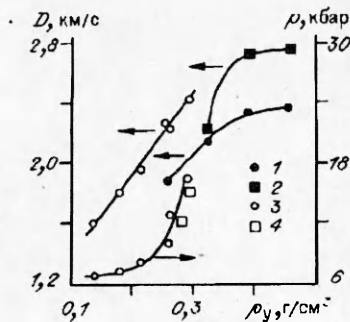


Рис. 2. Зависимость скорости детонации и давления от удельной плотности ВВ при различных размерах заряда и дисперсностях наполнителя.

1 — оболочка заряда $6,5/4$, дисперсность песка $\delta = 90 + 315$ мкм; 2 — $6,5/4$, $\delta = 315 + 700$ мкм; 3 — $21,5/18$, $\delta = 315 + 700$ мкм; 4 — $43/32$, $\delta = 315 + 700$ мкм.

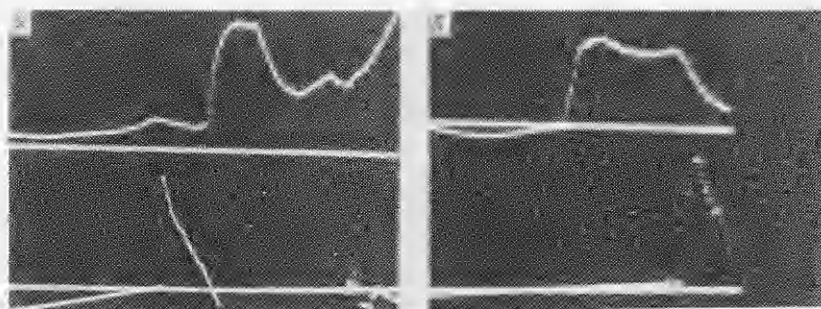


Рис. 3. Профили скорости.

Нижний луч — u , верхний — v . а — $\beta = 25\%$, амплитуда $v = 630$ м/с, амплитуда $u = 660$ м/с, интервал между фронтами импульсов 2,4 мкс, $D = 3,02$ км/с; б — $\beta = 10\%$, амплитуда $v = 520$ м/с, амплитуда $u = 450$ м/с, интервал между фронтами импульсов 6 мкс, $D = 2,02$ км/с.

шает заметно скорости частиц ($v \leq u$). Следовательно, при таком содержании ВВ процесс практически односкоростной. Реакция идет обычным образом за УВ. Фронт импульса u крутой, наблюдается некоторое подобие хемпики (рис. 3, а).

Дополнительно проведены опыты по передаче детонации через преграду. Возбуждающий и основной заряды с $\beta = 25\%$ в оболочках 21,5/18 разделялись пластинами из меди толщиной 0,5 и 1 мм или пластинами из оргстекла толщиной 9,5 мм (в первом случае цельной, во втором — с высверленными по всей площади поперечного сечения заряда отверстиями диаметром 0,8 мм). Задержки передачи детонации составили: для пластины из меди толщиной 0,5 и 1 мм приблизительно 3 и 9 мкс, для цельной пластины из оргстекла ≈ 4 мкс и для пластины из оргстекла с отверстиями $\approx 4,5$ мкс. Непрерывная регистрация фотографической методикой показывает, что продукты детонации, прошедшие через отверстия, не влияют на возбуждение реакции. Возможные механизмы возбуждения реакции в системе ВВ — песок: зажигание частиц ВВ сжатым воздухом в газовых включениях и возникновение горячих точек при деформации среды.

Другой характер имеет волна при низком содержании ВВ. Наблюдается плавное нарастание скорости частиц за время ≈ 1 мкс (рис. 3, б). Скорость газа v несколько больше u , что говорит в пользу распространения детонации не УВ, а конвективным образом, т.е. потоком газов, постепенно увлекающим зерна песка. Низкая чувствительность смеси не позволила провести сопоставление по механизму передачи детонации. Отметим, что двухфазные эффекты проявляются при содержании ВВ, близком к критическому; воспроизводимость таких опытов была заметно хуже.

Граничное содержание тэна можно оценить из следующих соображений. При плотной упаковке частиц песка (пористость $\varphi = 0,35$) и малом содержании ВВ более мелкие зерна ВВ расположены в порах и заполняют их при массовом содержании

$$\rho_0 \rho_0 / (\rho_0 \rho_0 + \rho_{\alpha} \alpha_0) \approx 0,17.$$

Здесь $\rho_0 = 0,9$ г/см³ — насыпная плотность ВВ; $\rho_{\alpha} \alpha_0 \approx 1,5$ г/см³ — насыпная плотность песка. При такой концентрации ВВ между зернами песка непременно имеются прослойки тэна (а реально они появляются при несколько меньшем содержании). Сжатие системы УВ приводит к деформации ВВ в прослойках и развитию реакции. Если же содержание ВВ мало, то зерна наполнителя контактируют между собой и защищают ВВ от воздействия волны; детонация передается конвективным способом. Практически граница между двумя режимами размывается из-за флуктуаций засыпки частиц и их возможного дробления в волне.

Таким образом, получены данные, указывающие на возможность различных режимов детонации в смеси тэн — кварцевый песок. Двухскоростной режим наблюдается при малом содержании ВВ, недостаточном для за-

полнения пор. При большем содержании ВВ процесс односкоростной и ведется ударной волной.

ЛИТЕРАТУРА

1. Хотин В.Г., Пономарев В.А. К вопросу о структуре детонационных волн в малоплотных зарядах конденсированных ВВ // ФГВ. — 1973. — 9, № 2. — С. 304—309.
2. Шведов К.К., Анискин А.И., Ильин А.Н. и др. Исследование детонации сильно разбавленных пористых ВВ. II. Влияние инертной добавки на структуру фронта, параметры и время реакции // ФГВ. — 1982. — 18, № 1. — С. 79—90.
3. Бабайцев И.В., Панарин Ю.П., Тышкевич В.Ф. Давление детонации смесей взрывчатых веществ с инертной добавкой // Взрывное дело. — М.: Недра, 1973. — № 72/29. — С. 20—24.
4. Бойко М.М., Крамаренко В.Н., Соловьев В.С. Особенности детонации низкоплотных ВВ с открытой пористостью // Химическая физика процессов горения и взрыва. Детонация. — Черногоровка, 1977. — С. 58—62.
5. Андреев В.В., Зубков П.И., Киселев Г.И. и др. Об одном из режимов детонации в порошковых ВВ малой плотности // Динамика сплошной среды. — Новосибирск, 1972. — Вып. 10. — С. 183—188.
6. Андреев В.В., Лукьянчиков Л.А. К механизму распространения детонации с малой скоростью в порошковом тэне при искровом инициировании // ФГВ. — 1974. — 10, № 6. — С. 912—919.
7. Андреев В.В., Ершов А.П., Лукьянчиков Л.А. Двухфазная низкоскоростная детонация пористого ВВ // Там же. — 1984. — 20, № 3. — С. 89—93.
8. Пинаев А.В., Лямкин Г.А. Низкоскоростная детонация ВВ в вакуумированной пористой среде // ДАН. — 1992. — 325, № 3. — С. 498—501.
9. Орлова Е.Ю. Химия и технология бризантных взрывчатых веществ. — Л.: Химия, 1960.
10. Воробьев А.А., Дремин А.Н., Саввин Л.И. др. Использование катушек Гельмгольца в электромагнитном методе // ФГВ. — 1983. — 19, № 4. — С. 146—150.
11. Дремин А.Н., Савров С.Д. и др. Детонационные волны в конденсированных средах. — М.: Наука, 1970.

630090, г. Новосибирск,
ИГиЛ СО РАН

Поступила в редакцию 23/VII 1993,
после доработки — 14/X 1993

УДК 539.89 + 637.226 + 678

С.С. Набатов, В.В. Якушев

АНАЛИЗ ОТКЛИКА ПЬЕЗОПОЛИМЕРНЫХ ДАТЧИКОВ ДАВЛЕНИЯ НА ПЛОСКУЮ УДАРНУЮ ВОЛНУ

Рассмотрена феноменологическая модель пьезополимерных датчиков давления, предназначенных для регистрации плоских ударно-волновых импульсов. Анализ отклика датчиков проведен с учетом физических явлений, наблюдаемых в поляризованных полимерных пленках при воздействии УВ высокой интенсивности, термодинамического состояния материала чувствительного элемента и параметров измерительной цепи. Проведено сопоставление численных расчетов с экспериментальными данными для датчиков из поливинилиденфторида в диапазоне динамических давлений до 16 ГПа. Показано, что при таких давлениях электрический отклик в основном определяется изменением остаточной поляризации пьезопленки за счет ее сжатия.

Анализ способов и средств регистрации динамических давлений показывает перспективность использования для этих целей датчиков на основе пьезопленочных полимерных материалов (ППМ). Под такими материалами будем понимать полимерные пленки, в которых специальным образом создана стабильная остаточная электрическая поляризация P_r в направлении, перпендикулярном плоскости образца.

Считается (например, [1—4]), что наиболее перспективным материалом для изготовления чувствительных элементов пленочных датчиков динамических давлений является поляризованный поливинилиденфторид (ПВДФ). Не исключено, однако, что для ряда конкретных областей применения оптимальными могут оказаться и некоторые другие пьезопленки.

© С.С. Набатов, В.В. Якушев, 1994.