

## ГОРЕНИЕ, ВЗРЫВ И УДАРНЫЕ ВОЛНЫ

УДК 541.126.662.21

### К ТЕОРИИ НЕИДЕАЛЬНОЙ СТАЦИОНАРНОЙ ДЕТОНАЦИИ ТРОЙНЫХ СМЕСЕЙ НИТРОМЕТАН + ПЕРХЛОРАТ АММОНИЯ + АЛЮМИНИЙ

© 2012 г. Б. С. Ермолаев, П. В. Комиссаров, Г. Н. Соколов, А. А. Борисов

*Институт химической физики им. Н.Н. Семенова Российской академии наук, Москва*

*E-mail: boris.ermolaev@yahoo.com*

Поступила в редакцию 28.12.2011

Развита модель стационарной неидеальной детонации тройных смесей нитрометан + перхлорат аммония + алюминий, богатых алюминием. Модель верифицирована сравнением с экспериментальными данными для парных и тройных смесей. Показано существенное недогорание компонентов до плоскости Чемпена–Жуге.

*Ключевые слова:* детонация неидеальная, нитрометан, перхлорат аммония, алюминий, смеси.

#### ВВЕДЕНИЕ

В последнее время интенсивно исследуются горение и детонация смесей твердого окислителя, высокоэнергетического горючего (например, алюминия) и газ-провайдера с целью повышения энергетики взрывчатых систем, в том числе за счет включения в процесс генерирования взрывных волн внешнего окислителя (воздуха или воды). К сожалению, в отличие от обычных ВВ, переходные режимы быстрого горения, инициирование и распространение различных режимов детонации в таких неидеальных системах, характеризующихся растянутой зоной реакции, изучены слабо.

В данной работе исследовались смеси, в которых нитрометан (НМ) служит компонентом, который повышает чувствительность смеси и плотность укладки порошкообразных компонентов, а также повышает газообразование; перхлорат аммония (ПХА) и алюминий (Al) обеспечивают высокую энергетику смеси. Соотношение между компонентами изменялось в широком диапазоне, при этом основное внимание уделялось смесям с большим избытком алюминия, что может дать дополнительный прирост энергии при окислении во внешней окислительной среде. Литературных данных о детонации таких смесей в литературе мы не нашли. Естественно ожидать, что она по своим свойствам окажется существенно неидеальной благодаря стадийной и гетерогенной природе реакций в смесях. Отличительными особенностями неидеального детонационного процесса являются: широкий диапазон скоростей детонации (типично от 2 до 7 км/с) с различной степенью превращения компонентов в пределах зоны реакции детонационной волны, зависимость параметров детонации от диаметра заряда,

плотности и (пористости), дисперсности компонентов и свойств оболочки.

Таким образом, чтобы анализ детонации был представительным, необходимо включить в рассмотрение скорости химических превращений компонентов. Основную трудность представляет получение адекватной информации по скоростям превращения компонентов. Даже НМ, скорость превращения которого в ударных волнах хорошо изучена, в смесях с добавками инертных материалов ведет себя совершенно иначе, чем в виде исходной жидкости, демонстрируя сильное влияние дисперсности добавки на детонационную способность. Поведение ПХА в детонационных волнах существенным образом зависит не только от дисперсности частиц, но также от плотности заряда и наличия добавок. Величины скоростей горения Al в детонационных волнах, несмотря на многолетние исследования, остаются предметом дискуссий. Поэтому в качестве предварительного этапа потребовалось изучить поведение ПХА и двойных смесей НМ + ПХА и ПХА + Al в ударно-сжатом веществе. Главным источником информации о скоростях химического превращения этих материалов является теоретический анализ экспериментальных данных по зависимости скорости детонации от диаметра заряда.

Цель настоящей работы – выяснение механизма детонации тройных смесей, что приводит к необходимости решать многопараметрическую задачу. Для этого проведен анализ литературных данных по неидеальной детонации двойных смесей исследуемых компонентов: НМ + Al, НМ + ПХА и ПХА + Al. Параллельно проведены термодинамические расчеты, в том числе с учетом возможности частичного реагирования и неравновесности в продуктах, с тем, чтобы создать бо-

Таблица 1. Значения скорости детонации смесей НМ + Al, эксперимент [1, 2] (НМ загущен добавкой 3% ПММА) и термодинамический расчет

Состав (размер частиц)	$\rho_0$ , г/см <sup>3</sup>	Скорость детонации, м/с				Ссылка
		экспе- римент	первый вариант расчета (активный Al)	второй вариант расчета (инертный Al)	третий вариант расчета (инертный Al)	
НМ <sub>с</sub> : 97% НМ + 3% ПММА	1.14	6290				[1]
80% НМ <sub>с</sub> + 20% Al (5 мкм)	1.28	6100	6290	6190	6000	[1]
80% НМ <sub>с</sub> + 20% Al (нано)	1.30	5880–5980				[1]
60% НМ <sub>с</sub> + 40% Al (5 мкм)	1.48	5760	4960	6000	5560	[1]
60% НМ <sub>с</sub> + 40% Al (нано)	1.48	5500				[1]
40% НМ + 60% Al (8 мкм)	1.73	–	5233	5840	5080	[2]
30% НМ + 70% Al (8 мкм)	1.90	5800		5800	4830	[2]
10% НМ + 90% Cu (95 мкм)	5.27	3600		3790		[2]

Примечание: НМ<sub>с</sub> обозначает загущенную смесь нитрометана: 97% НМ + 3% ПММА.

лее полное представление о ситуации в зоне реакции детонационной волны. Затем представлена модель стационарной неидеальной детонации трех компонентной смеси, даны примеры процедуры калибровки уравнений состояния и приведены результаты моделирования детонации чистого ПХА, двухкомпонентной смеси ПХА + Al и стехиометрической смеси НМ + ПХА.

## 1. ЛИТЕРАТУРНЫЕ ДАННЫЕ И ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ОЦЕНКИ (В ТОМ ЧИСЛЕ С УЧЕТОМ НЕПОЛНОГО ПРЕВРАЩЕНИЯ КОМПОНЕНТОВ)

В этом разделе рассмотрены литературные данные по неидеальной детонации двойных смесей НМ + Al [1, 2], НМ + ПХА [3] и ПХА + Al [4, 5]. Кроме того, приведены термодинамические оценки, полученные с помощью программы VK-WS [6]. Известно [7], что эта программа хорошо воспроизводит экспериментальные характеристики идеально детонирующих ВВ. Для неидеально детонирующих смесей программа позволяет проводить расчеты в предположении, что один из компонентов смеси (например, алюминий) не участвует в химическом взаимодействии или участвует лишь частично. Таким образом, будут представлены три варианта термодинамических расчетов:

- 1) стандартный вариант, когда предполагается полное термодинамическое равновесие в продуктах детонации;
- 2) вариант с инертным компонентом, который не включается в число компонентов – продуктов реакции; поведение инертного компонента определяется его ударной адиабатой;
- 3) вариант с инертным компонентом, который не участвует в химическом превращении, но

находится в тепловом равновесии с продуктами реакции (т.е., забирает часть теплоты реакции на прогрев).

### 1.1. Слой мелкодисперсного алюминия, пропитанный нитрометаном

В табл. 1 приведены экспериментальные данные по скорости детонации для смесей загущенного НМ с 20 и 40% Al в виде порошков размером частиц 5 мкм и наночастиц (опыты проводились в латунных трубах внутренним диаметром 22.4 мм, данные взяты из [1]), а также данные, взятые из [2], по детонации слоя металлического порошка (алюминий, медь), насыщенного НМ, при массовой доле металла 70–90% (опыты проводились в пластиковых трубах диаметром 31 мм). Там же приведены расчетные данные. Из табл. 1 следует, что

– измерения показывают снижение скорости детонации смеси относительно чистого (или загущенного) НМ; дефицит скорости тем больше, чем выше содержание Al (несмотря на рост плотности смеси) и чем меньше размер частиц;

– наиболее вероятно, что порошок Al, даже самый мелкодисперсный, не успевает сгореть в пределах зоны реакции детонационной волны НМ;

– из трех вариантов термодинамических расчетов лучшее согласие с экспериментом при содержании мелкодисперсного порошка Al 20–40% дает третий вариант – Al инертный с затратами тепла на прогрев, а при 70%-ном содержании Al и для слоя из крупных медных частиц – второй вариант – металл инертный без затрат тепла на прогрев.

### 1.2. Смеси НМ + ПХА

Литературные данные по скорости детонации для смесей НМ + ПХА взяты из работы [3] и приведены на рис. 1. Нитрометан загущали небольшой добавкой полиметилметакрилата, подбирая количество добавки таким образом, чтобы избежать расслоения смеси в процессе подготовки и проведения опыта. Опыты проводили в стальных трубах со стенками толщиной 2 мм при варьировании диаметра оболочки, а также содержания и размера частиц ПХА. Из приведенных данных следует, что

– уменьшение размера частиц ПХА (от 200 до 9 мкм) вызывает значительный рост скорости детонации, которая при некоторых диаметрах заряда достигает 1000–1300 м/с;

– увеличение диаметра заряда от 4 до 40 мм также вызывает заметный рост скорости детонации – типично на 500–600 м/с. Зависимость скорости детонации от обратного диаметра заряда имеет форму монотонной кривой со слабой выпуклостью вниз;

– при уменьшении содержания ПХА в смеси от 54 до 39% скорость детонации изменяется различным образом в зависимости от размера частиц ПХА: при прочих равных условиях в случае мелких частиц ПХА скорость детонации снижается, а в случае крупных частиц ПХА она возрастает;

– из приведенных результатов можно заключить, что ПХА в виде частиц размером 9 мкм активно участвует в химическом превращении в пределах зоны реакции детонационной волны, а частицы размером 200 мкм ведут себя как инертный материал.

Термодинамические расчеты, выполненные для стехиометрической смеси 46% НМ + 54% ПХА по второму варианту, в предположении, что ПХА полностью или частично является инертным, представлены в табл. 2. Сравнивая рассчитанные и измеренные скорости детонации, можно получить дополнительное подтверждение вывода о том, что крупные частицы ПХА ведут себя как инертный материал, а частицы ПХА разме-

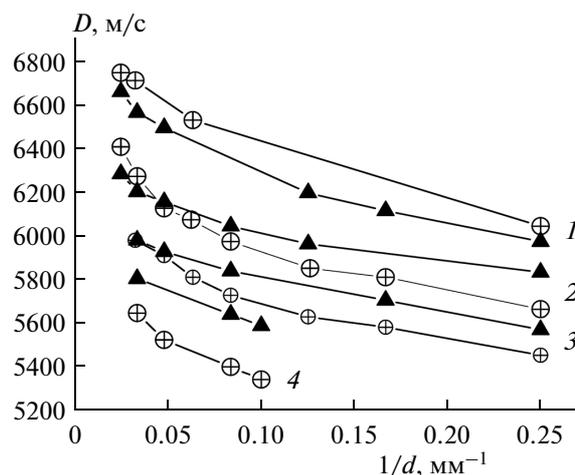


Рис. 1. Зависимость скорости детонации смесей 46% НМ + 54% ПХА (светлые кружки) и 69% НМ + 31% ПХА (черные треугольники) от диаметра стальной оболочки и размера частиц ПХА [3]: 1 – 9 мкм, 2 – 35 мкм, 3 – 90 мкм, 4 – 200 мкм.

ром 9 мкм по крайней мере на половину своей массы, участвуют в экзотермическом превращении.

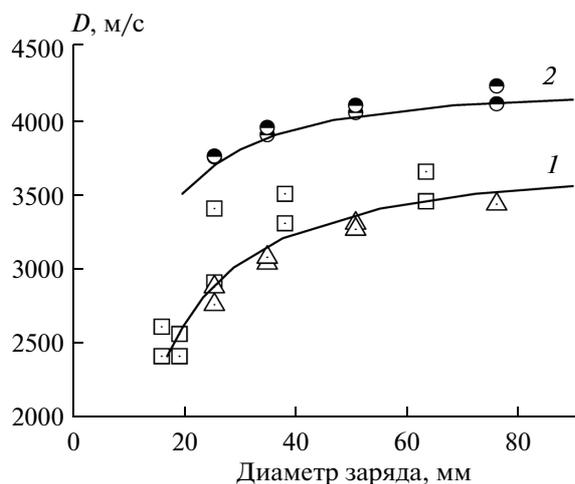
### 1.3. Смеси ПХА + алюминий

В литературе имеются обширные данные по скорости детонации мелкодисперсных смесей ПХА с 5 и 10 вес. % Al и чистого ПХА в зарядах диаметром от 20 до 100 мм в целлофановых оболочках (см., например, [4, 5]). Эти данные демонстрируют сильное влияние размера частиц в опытах с чистым ПХА, а также характерную кривую зависимости скорости детонации от плотности заряда с максимумом. Введение Al вызывает значительный рост скорости детонации (на величину до 700 м/с) при прочих равных условиях. В качестве иллюстрации на рис. 2 приведены результаты измерений для чистого ПХА и смеси ПХА + 10% Al в зарядах плотностью 1–1.1 г/см<sup>3</sup>.

Термодинамические расчеты выполнены по первому варианту, когда предполагается полное

Таблица 2. Влияние доли ПХА, оставшейся инертной, на параметры детонации Чемпена–Жуге, рассчитанные для стехиометрической смеси 46% НМ + 54% ПХА

Процент ПХА, оставшегося инертным	$D$ , м/с	$P$ , ГПа	$T$ , К	$n$	$Q$ , МДж/кг	$C$ , м/с
54	5544	9.6	3228	3.664	2.1	4355
40	6148	12.4	3548	3.44	2.92	4763
30	6508	14.27	3744	3.32	3.55	5000
20	6801	16.1	3928	3.18	4.2	5175
10	7040	17.8	4051	3.06	4.81	5304
0	7210	19.0	4109	3.0	5.34	5404



**Рис. 2.** Зависимость скорости детонации от диаметра заряда для чистого ПХА с размер частиц 12 (□) и 8 мкм (△) — эксперимент [4] и [5], соответственно (кривая 1 — расчет), и смеси ПВХ (8 мкм) + 10% Al (7 мкм): ● — эксперимент [5], кривая 2 — расчет; плотность заряда — 1000–1100 кг/м<sup>3</sup>.

термодинамическое равновесие в продуктах детонации. Расчеты дают монотонный рост скорости детонации при увеличении плотности заряда как для чистого ПХА, так и для смесей ПХА с Al с темпом около 300–360 м/с на каждые 0.1 г/см<sup>3</sup> прироста плотности. Введение Al дает прирост скорости около 200 м/с, что гораздо скромнее, чем прирост, наблюдаемый в эксперименте. Некоторые расчетные данные приведены в табл. 3.

#### 1.4. Тройные композиции HM + ПХА + Al

Экспериментальные данные получены в данной работе в толстых стальных трубах внутренним диаметром 18 мм и с толщиной стенки 9 мм. Использовали порошок ПХА с частицами менее 40 мкм и порошок Al чешуйчатый марки ПАП-2. В табл. 4 приведены значения измеренной скорости детонации и термодинамические расчеты для двух композиций. Расчеты проведены как в предположении о полном термодинамическом равновесии (вариант 1), так и в предположении, что не-

которая часть ПХА и/или Al не участвует в химическом превращении. Использован так же вариант 2, когда поведение инертных компонентов определяется их ударной адиабатой. Соответствующие подварианты расчета обозначены так: (2a) — весь алюминий, содержащийся в смеси, инертен; (2b) — весь алюминий, а также 40 вес. % ПХА, содержащегося в смеси, инертны; (2c) — инертны только 20 вес. % Al, содержащегося в смеси; (2d) — весь Al и ПХА, содержащиеся в смеси, инертны.

Из сравнения расчетных и измеренных данных по скорости детонации можно заключить, что расчеты, выполненные в предположении полного термодинамического равновесия в продуктах детонации, дают значения скорости детонации, сильно превышающие измеренные. Согласно между экспериментом и расчетом получено в предположении, что весь Al и большая часть ПХА не участвуют в химическом превращении. Впрочем, расчет, очевидно, дает завышенную оценку скорости детонации из-за существующих потерь на боковое расширение и прогрев несгоревшего Al, и для получения более точных оценок нужны расчеты в рамках газодинамической модели детонации. Тем не менее не остается сомнений, что для рассмотренных тройных композиций химическое превращение в зоне реакции идет с очень большой неполнотой и значительная часть Al и ПХА не успевает сгореть в пределах детонационной волны.

## 2. КВАЗИОДНОМЕРНАЯ МОДЕЛЬ СТАЦИОНАРНОЙ НЕИДЕАЛЬНОЙ ДЕТОНАЦИИ ТРЕХКОМПОНЕНТНОЙ СМЕСИ

Модель является развитием подхода, предложенного ранее в [8, 9].

### 2.1. Основные положения модели

— Модель рассматривает стационарную зону реакции детонационной волны, которая распространяется с постоянной скоростью вдоль цилиндрического заряда взрывчатого материала радиу-

**Таблица 3.** Расчетные параметры детонации ПХА и смеси ПХА + 10% Al при плотностях заряда 1–1.2 г/см<sup>3</sup>

Состав	$\rho_0$ , г/см <sup>3</sup>	$D$ , м/с	$P$ , ГПа	$T$ , К	$Q$ , МДж/кг
ПХА	1.0	3770	3.4	2031	1.6
	1.1	4110	4.3	2012	
	1.2	4470	5.4	1984	
ПХА + 10% Al	1.0	4040	4.4	3904	4.1
	1.1	4340	5.4	3892	
	1.2	4660	6.6	3874	

Таблица 4. Пример измеренных и расчетных параметров детонации тройных композиций

Состав	$\rho_0$ , г/см <sup>3</sup>	$D$ , м/с (эксперимент)	Расчет				
			вариант расчета	$D$ , м/с	$P$ , ГПа	$T$ , К	$Q$ , МДж/кг
10% NM + 45% AP + 45%Al	1.23	2700	(1)	4390	6.4	5890	8.5
			(2a)	3900	4.3	3110	1.7
			(2b)	2720	1.93	4160	1.0
20% NM + 40% AP + 40% Al	1.46	3500	(2c)	5570	10.8	5790	6.9
			(2a)	5280	9.2	3770	2.1
			(2d)	3560	3.4	3270	0.83

сом  $R_c$ . Заряд может быть помещен в оболочку, например из стали, со стенками толщиной  $H_c$ , либо наличием оболочки можно пренебречь, как, например, в случае оболочек из тонких листов целлофана или бумаги.

– Исходный взрывчатый материал – смесь трех компонентов, два из которых, ПХА и алюминий, представлены в виде порошков разной дисперсности, а третий компонент – нитрометан – жидкость. Консистенция исходного материала – паста или сыпучая смесь в зависимости от содержания нитрометана и пористости.

– Реагирующая среда представляет собой смесь исходных компонентов и продуктов их химического превращения. Для рассматриваемой трехкомпонентной смеси используется схема, представленная на рис. 3.

– Состояние смеси определяется через массовую долю, плотность и внутреннюю энергию компонентов смеси с учетом их уравнений состояния и правила аддитивности.

– Компоненты находятся в локальном механическом равновесии, т.е., имеют одинаковые давление  $P$  и массовую скорость  $U$ ; продукты P4, P5 и P6 имеют одинаковую температуру, которая отличается от температур исходных компонентов – R1, R2 и R3.

– Квазиодномерное приближение, использованное для расширяющегося потока реагирующей среды, позволяет свести задачу к интегрированию системы обыкновенных дифференциальных уравнений с граничными условиями, заданными на ударном фронте волны.

– Предполагается, что химическое превращение нитрометана и горение дисперсных компонентов начинаются без задержки сразу за фронтом волны. Здесь мы опираемся на теоретические оценки [10], согласно которым задержка воспламенения в горячих точках при ударно-волновом сжатии гетерогенного ВВ быстро уменьшается по мере того, как растет разница между давлением во фронте волны,  $P_f$ , и пороговым давлением ини-

цирования химической реакции в горячих точках,  $P_{ign}$ . В случае детонационной волны разумно предположить, что разность  $P_f - P_{ign}$  не является малой величиной, т.е. превышает то пороговое ее значение, при котором задержка воспламенения становится значительно короче, чем время последующего превращения компонентов в продукты. Химическое превращение начинается в нитрометане на поверхности частиц дисперсных компонентов смеси в результате кумуляции ударных волн, возникающих из-за разности плотностей, или в результате схлопывания пузырьков газа, которые, пусть и в небольшом объеме, скорее всего остаются на поверхности дисперсных частиц при приготовлении смеси. Затем химическое превращение распространяется от поверхности частиц вглубь в режиме взрывного горения.

Уравнения модели (всего 22 уравнения для 22 переменных) запишем в системе координат, связанной с фронтом волны ( $x \geq 0$ ). Уравнения баланса массы, количества движения и энергии всей смеси:

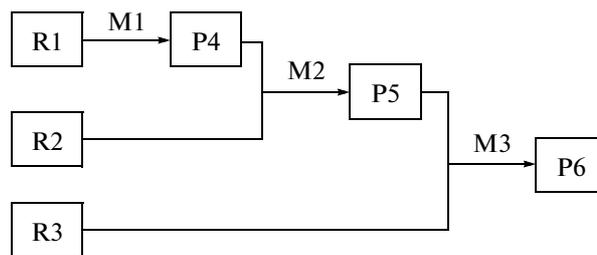


Рис. 3. Схема расчета параметров детонации тройных смесей: R1 – НМ (взрывчатый сенсibilизатор), R2 – ПХА, R3 – Al, P4 – продукт химического превращения НМ, P5 – продукт горения ПХА в продуктах превращения НМ, P6 – конечный продукт химического превращения смеси (продукт горения Al в окисляющей смеси продуктов горения НМ и ПХА); M1 – реакция превращения НМ в продукт P4, M2 – реакция горения ПХА в продукте P4, приводящая к образованию продукта P5, и M3 – реакция горения Al в атмосфере окисляющих газов P5, приводящая к образованию конечного продукта – P6.

$$\frac{d}{dx}(\rho U) = -\rho U \frac{d}{dx}(\ln S), \quad \rho U \frac{dU}{dx} + \frac{dP}{dx} = 0, \quad (1)-(3)$$

$$\frac{de}{dx} - \frac{P}{\rho^2} \frac{d\rho}{dx} = 0.$$

Уравнения баланса массы и энергии компонентов смеси:

$$\rho U \frac{d\eta_j}{dx} = -M_j, \quad j = 1-5; \quad (4)-(8)$$

$$\frac{de_j}{dx} - \frac{P}{\rho_j^2} \frac{d\rho_j}{dx} = 0, \quad j = 11-3. \quad (9)-(11)$$

Уравнения состояния для каждого из шести компонентов смеси, записанное в форме Ми-Грюнайзена:

$$P = \Gamma_j \rho_j (e_j - e_{0j}) + B_j \left[ \left( \frac{\rho_j}{\rho_{j0}} \right)^{l_j} \left( 1 - \frac{\Gamma_j}{l_j - 1} \right) - \Gamma_j - 1 + \frac{\rho_j}{\rho_{j0}} \frac{\Gamma_j l_j}{l_j - 1} \right], \quad j = 1-3; \quad (12)-(14)$$

$$P = \Gamma_j \rho_j (e_j - e_{0j}) + B_j \rho_j^{m_j} \left( 1 - \frac{\Gamma_j}{m_j - 1} \right), \quad j = 4-6. \quad (15)-(17)$$

Два уравнения равенства температур компонентов P4, P5 и P6 имеют вид

$$P \left( 1 - \frac{\Gamma_j \rho_j c_{vj}}{\Gamma_4 \rho_4 c_{v4}} \right) = B_j \rho_j^{m_j} - \frac{\Gamma_j c_{vj}}{\Gamma_4 c_{v4}} B_4 \rho_4^{n_4}, \quad j = 5, 6. \quad (18)-(19)$$

Алгебраические связи для смеси:

$$e = \sum \eta_i e_i, \quad 1/\rho = \sum \eta_i / \rho_i, \quad \sum \eta_i = 1. \quad (20)-(22)$$

В этих уравнениях  $U$  – массовая скорость,  $e$  – внутренняя энергия,  $\rho$  – плотность,  $P$  – давление,  $\eta$  – массовая доля,  $S$  – площадь поперечного сечения трубки тока,  $M$  – интенсивность химического превращения,  $\Gamma$  – коэффициент Грюнайзена,  $c_v$  – теплоемкость, индексом “0” обозначено начальное состояние. Химическая энергия горения равна разности значений  $e_{0j}$  для соответствующих компонентов.

Коэффициенты уравнений состояния (12)–(14) для исходных компонентов смеси  $R_j$  подбирали с использованием имеющихся данных по ударной адиабате и величине коэффициента Грюнайзена. Аналогичные коэффициенты в уравнениях (15)–(17) для газовых компонентов  $P_j$  подбирали так, чтобы с их помощью достигалась наилучшая аппроксимация в параметров детонации термодинамических расчетах. Эти расчеты проводили, варьируя плотность заряда в диапазоне, который позволял получить давле-

ния детонации, ожидаемые при анализе детонационной волны.

В правой части уравнения (1) содержится член  $d(\ln S)/dx$ , который отвечает за эффекты дивергенции течения (кривизна фронта детонационной волны, боковое расширение для заряда, помещенного в оболочку). Для определения  $d(\ln S)/dx$  могут быть использованы различные подходы, в зависимости от конкретной ситуации. Рассмотрим два из них.

В случае, когда детонационная волна имеет слабо искривленный фронт (когда радиус кривизны фронта много больше толщины зоны реакции), вводятся предположения о том, что скорость волны по нормали к фронту есть функция локальной кривизны фронта ( $K$ ) и что течение в зоне реакции близко к сферически-симметричному. Это приводит к следующей формуле [11]:

$$d(\ln S)/dx = (D/U - 1) K / (1 - Kx/2). \quad (23)$$

Другой случай относится к неидеальной детонации заряда, помещенного в массивную стальную оболочку, когда скорость детонации оказывается ниже скорости звука в материале оболочки. В этом случае вдоль оболочки впереди фронта детонации бегут волны сжатия, и в принципе теоретическое решение со строго стационарной волной становится невозможным. Однако, как показывают измерения [12], детонационная волна имеет постоянную скорость, причем ее величина зависит от инерционных и прочностных свойств оболочки. Для этого случая можно предположить, что эффект кривизны фронта пренебрежимо мал и дивергенция потока определяется радиальным расширением канала оболочки. В результате выполняются следующие уравнения:

$$d(\ln S)/dx = 2V_r/(RD), \quad (24)$$

где  $R$  – текущий радиус канала, а  $V_r$  – радиальная скорость расширения канала оболочки, определяемая уравнением

$$\rho_w H_c D (R_c + H_c/2) \frac{d}{dx} (V_r) = \begin{cases} R(P - P_w), \\ 0, P < P_w. \end{cases}$$

Здесь  $H_c$  и  $R_c$  – толщина оболочки и начальный радиус канала,  $\rho_w$  и  $Y$  – плотность и предел текучести материала оболочки,  $P_w = Y \ln(1 + H_c/R_c)$  – прочность оболочки. Формула получена в предположениях, что расширение оболочки происходит в режиме идеальной пластичности и что эффектами сжимаемости материала оболочки и уменьшения прочности оболочки в процессе деформирования можно пренебречь.

Уравнения для скоростей химического превращения компонентов выбраны в рамках модели взрывного горения с учетом имеющихся подходов и в максимально простом виде. Для реакций с участием НМ и ПХА ( $j = 1, 2$ ) они имеют вид:

$$M_j = \rho_{j0}(\eta_j/\eta_{j0})^k G_j(P/P_r)^n. \quad (25)$$

Здесь  $\rho_{j0}$  и  $\eta_{j0}$  обозначают удельный вес и начальную массовую долю компонента  $j$ . Уравнение включает в себя три произвольных коэффициента: коэффициент скорости горения  $G_1$ , показатель степени по давлению  $n$  и показатель дегрессивности горения  $k$ . Параметр  $P_r$  введен для удобства с тем, чтобы выразить коэффициент  $G_1$  в сек<sup>-1</sup> независимо от показателя по давлению, и принят равным 1 ГПа. Для ПХА, предполагая, что горение частиц идет с уменьшением их поверхности, разумно принять, что  $k = 2/3$ . В случае НМ, горение скорее всего идет без уменьшения их поверхности (см., например анализ для смесей НМ с микросферами [13]), и коэффициент  $k$  целесообразно уменьшить до уровня 0.2–0.3.

Для алюминия мы выбрали уравнение, которое учитывает зависимость скорости горения от концентрации окисляющих компонентов в газобразных продуктах:

$$M_3 = \rho_{30} G_3 \left( \frac{\eta_3}{\eta_{30}} \right)^{2/3} \left( \frac{P}{P_r} \right)^n \left( \frac{C_{ox}}{1 + \eta_6/\eta_5} \right)^s. \quad (26)$$

Здесь коэффициент  $C_{ox}$  – мольная доля окислительных компонентов, участвующих в горении частиц алюминия. Отсутствие надежной модели горения Al в продуктах детонации затрудняет выбор коэффициентов. В наших расчетах мы использовали  $n = 0$  и  $s = 1$ .

Граничными условиями служат условия на фронте детонационной волны (при  $x = 0$ ), который рассматривается как ударный скачок, бегущий по исходной смеси со скоростью детонации. Параметры на фронте волны обозначим индексом “ $f$ ”, а характеристики исходной смеси – индексом “0”. Система уравнений включает обычные уравнения сохранения массы, количества движения и энергии смеси на скачке, которые соответственно имеет вид

$$\rho_0 D = \rho_f U_f, \quad (27)$$

$$P_f = \rho_0 D(D - U_f) = \rho_0 D^2(1 - \rho_0/\rho_f), \quad (28)$$

$$e_f = e_0 + (D - U_f)^2/2 = e_0 + [D(1 - \rho_0/\rho_f)]^2/2. \quad (29)$$

К ним нужно добавить уравнения состояния исходных компонентов (12)–(14), алгебраические связи для смеси (20)–(22), а также соотношения, которые определяют, как энергия ударного сжатия смеси, т.е.  $[D(1 - \rho_0/\rho_f)]^2/2$ , распределяется между ее компонентами, которые, напомним, различаются по плотности и сжимаемости. Мы использовали предположение, следуя Мадеру [14], что распределение происходит обратно пропорционально их импедансам  $\rho_{j0} B_{j,j}$ , т.е., компонент, который имеет меньшую плотность и легче сжимается, забирает при сжатии большую часть энергии.

Исходная система обыкновенных дифференциальных уравнений интегрируется от фронта волны ( $x = 0$ ). Единственное решение проходит через особую точку типа “седло”. В этой точке число Маха равно единице, а эффекты, создаваемые химическим превращением и дивергенцией потока, уравновешены. Решение определяется методом “пристрелки”. Для зарядов в стальной оболочке, когда дивергенция потока подчиняется уравнению (24), решение сразу дает значение скорости детонации  $D$ .

Для зарядов в слабой оболочке, когда дивергенция потока подчиняется уравнению (23), система уравнений содержит дополнительный параметр – кривизну фронта  $K$ , поэтому решение разделяется на два этапа. На первом этапе решение уравнений зоны реакции методом “пристрелки” проводится с варьированием скорости детонации, которая имеет смысл скорости волны по нормали к фронту,  $D_n$ . В результате определяется функциональная зависимость  $K(D_n)$ . На втором этапе эта зависимость используется, чтобы реконструировать форму искривленного фронта детонационной волны. Процедура состоит в следующем. Задается скорость детонации  $D$  вдоль оси заряда и интегрируется уравнение, описывающее форму фронта волны в координатах  $Y(r)$ :

$$Y'' = (1 + Y'^2) [K(1 + Y'^2)^{1/2} - Y'/r], \quad (30)$$

с граничным условием на оси заряда:

$$Y = Y' = 0 \text{ при } r = 0. \quad (31)$$

Здесь аргумент функции  $K(D_n)$  связан со скоростью детонации  $D$  уравнением

$$D_n = D / (1 + Y'^2)^{1/2}. \quad (32)$$

Уравнение (30) интегрируется до кромки заряда при  $r = R_c$ , причем величина  $R_c$  определяется из условий стыковки заряд – оболочка, которые выводятся с использованием известных процедур. В случае, когда заряд имеет слабую оболочку или не имеет ее вовсе, на его кромке выполняется условие, что скорость частиц вдоль линии тока на фронте становится равной скорости звука. Это условие можно записать в следующем виде:

$$C_f^2 = U_f^2 + D^2 / [1 + (Y')^{-2}]. \quad (33)$$

## 2.2. Входные данные модели. Уравнения состояния компонентов

Входные параметры модели в виде набора коэффициентов, входящих в уравнение состояния (12), получены на основе экспериментальной информации по ударным адиабатам и теплофизическим свойствам этих материалов и их значения приведены в табл. 5.

Таблица 5. Параметры уравнения состояния исходных компонентов и коэффициенты ударной адиабаты ( $D = C_0 + SU$ )

Компонент	$\rho_{j0}$ , кг/м <sup>3</sup>	$C_0$ , м/с	$S$	$B_j$ , ГПа	$l_j$	$\Gamma$	$e_{j0}$ , МДж/кг	$c_v$ , кДж/кг · К
НМ	1127	1650	1.64	0.46	5.9	0.68	-1.85	1.73
ПХА	1950	2900	1.6	2.37	6.4	0.92	-2.52	1.26
Al	2700	5350	1.35	10.74	6.8	1.7	-0.415	0.89

Таблица 6. Параметры детонации Чепмена–Жуге, рассчитанные для стехиометрической смеси 46% НМ + 54% ПХА при различных значениях начальной плотности

$\rho_0$ , кг/м <sup>3</sup>	$D$ , м/с	$P$ , ГПа	$T$ , К	$\rho/\rho_0$	$Q$ , МДж/кг	$Y$ , г/моль	$C$ , м/с
600	4218	3.32	4165	1.452	5.01	26.76	2907
700	4551	4.35	4179	1.43	5.07	26.85	3185
800	4888	5.55	4188	1.409	5.13	26.94	3468
900	5230	6.94	4190	1.393	5.18	27.03	3755
1000	5577	8.55	4189	1.38	5.23	27.11	4044
1100	5928	10.38	4182	1.367	5.27	27.2	4336
1300	6644	14.74	4148	1.346	5.32	27.34	4938
1455	7210	18.95	4109	1.334	5.34	27.45	5404

Для продуктов химического превращения параметры уравнения состояния определялись по результатам термодинамических расчетов. В качестве примера рассмотрим продукты превращения смеси 46% НМ + 54% ПХА. Первый шаг – расчет параметров детонации Чепмена–Жуге (ЧЖ) в зависимости от начальной плотности смеси. Результаты расчетов приведены в табл. 6. Второй шаг – подбор коэффициентов уравнения состояния в форме уравнения (15), с помощью которых удастся наилучшим образом воспроизвести основные ха-

рактеристики детонационной волны: давление, скорость детонации, скорость звука во всем представленном диапазоне их изменения. Примеры сопоставления по квадрату скорости звука и давлению приведены на рис. 4. В окончательном виде значения коэффициентов уравнения состояния продуктов детонации как для этой смеси, так и для других компонентов, вместе с диапазоном давлений, в котором была осуществлена калибровка, даны в табл. 7.

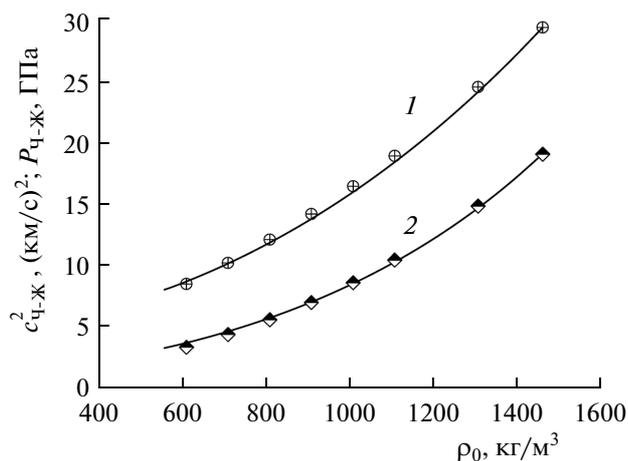


Рис. 4. Сравнение расчетов по уравнению состояния в форме (15) с термодинамическими данными для детонации в плоскости Чепмена–Жуге стехиометрической смеси НМ + ПХА по квадрату скорости звука (1) и давлению (2)

### 2.3. Результаты моделирования неидеальной детонации для ПХА и двойных смесей ПХА с НМ и Al

Расчеты проводились применительно к имеющимся экспериментальным данным с целью подобрать значения коэффициентов скорости химического превращения, при которых расчетные зависимости скорости детонации от диаметра заряда наиболее близко согласуются с результатами измерений.

**Чистый ПХА.** Из многочисленных данных мы выбрали три серии измерений, в которых плотность заряда (1.0 и 1.25 г/см<sup>3</sup>) и размер частиц ПХА (8 и 12 мкм) были различными. Результаты расчетов скорости детонации вместе с экспериментальными данными для ПХА с размером частиц 8–12 мкм приведен на рис. 2. Во всех трех сериях получено хорошее согласие по уровню скорости детонации и виду ее зависимости от диаметра заряда. Расчеты проводились при одинаковом показателе степени по давлению в фор-

Таблица 7. Параметры уравнения состояния продуктов химического превращения в форме (15) и диапазон давлений, в котором проведена калибровка

	$B_j$	$m_j$	$\Gamma$	$e_{j0}$ , МДж/кг	Диапазон давлений, ГПа
НМ	7.38E - 02	3.4762	0.6	-6.45	2–14
ПХА	4.22E - 03	3.775	0.48	-4.08	1–15
46%НМ + 54% ПХА	0.2325	3.294	0.5	-7.55	3–19
90% ПХА + 10%Al	8.855E - 03	3.658	0.3	-6.38	1–15

муле (25),  $n = 1$ , однако константа скорости  $G$  была различной. Так, в случае заряда ПХА с размером частиц (10–12 мкм) плотностью  $1 \text{ г/см}^3$  константа  $G = 0.43 \text{ мкс}^{-1}$ . Пример формы фронта волны при скорости детонации 3500 м/с вместе с распределением давления вдоль фронта, резко спадающим вблизи кромки заряда, дан на рис. 5. На кромке заряда (при  $R_c = 38 \text{ мм}$ ) выполняется условие (33).

При увеличении размера частиц ПХА до 26 мкм нам пришлось снизить коэффициент  $G$  с 0.43 до  $0.22 \text{ мкс}^{-1}$ , а при увеличении плотности заряда до  $1.25 \text{ г/см}^3$  константа  $G$  уменьшилась с 0.43 до  $0.16 \text{ мкс}^{-1}$ . Влияние размера частиц, очевидно, связано с пропорциональным уменьшением поверхности горения. Что касается снижения скорости реакции при увеличении плотности заряда, то этот факт также хорошо известен и используется при классификации взрывчатых материалов на две группы, однако до сих пор не имеет ясного объяснения. Потребность в разработке адекватной модели очевидна.

Мелкодисперсный ПХА с добавками 5 и 10% Al. Из многочисленных данных мы выбрали две се-

рии измерений, которые были проведены на смесях мелкодисперсного порошка ПХА (8 мкм) с алюминием (7 мкм) сферических частиц с зарядом плотностью  $1.1 \text{ г/см}^3$  в целлофановых оболочках. Для скорости превращения ПХА мы выбрали значения коэффициентов  $n = 1$  и  $G_1 = 0.43 \text{ мкс}^{-1}$ , которые были получены выше путем обработки опытов с чистым ПХА (10–12 мкм) при плотности  $1 \text{ г/см}^3$ . Константу скорости горения алюминия  $G_3 = 0.6 \text{ мкс}^{-1}$  подобрали таким образом, чтобы расчет давал хорошее согласие с экспериментом по зависимости скорости детонации от диаметра заряда. Соответствующие результаты приведены на рис. 2 и 6. Пример пространственных профилей основных характеристик течения в зоне реакции детонационной волны вдоль оси заряда (давление, число Маха, концентрации реагентов) приведен на рис. 7.

Предварительные выводы таковы. Оба компонента смеси участвуют в химическом превращении в пределах зоны реакции детонационной волны, ширина которой составляет чуть менее 2 мм (время пребывания – около 0.8 мкс). В примере, который показан на рис. 7, к точке Чепме-

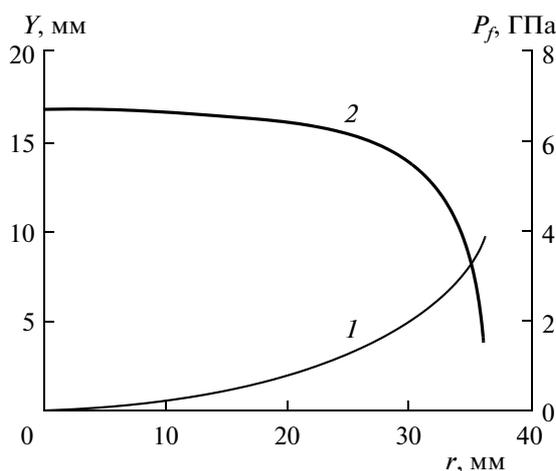


Рис. 5. Форма фронта детонационной волны (1) и распределение давления вдоль фронта (2). Чистый ПХА плотностью  $1000 \text{ кг/м}^3$ , расчет для скорости детонации 3500 м/с при  $G = 0.43 \text{ мкс}^{-1}$

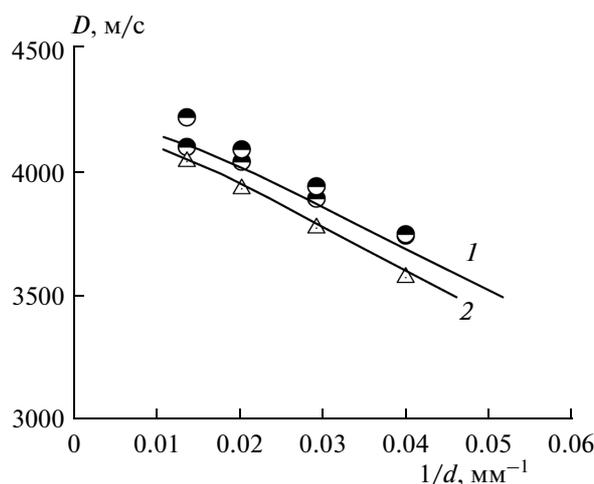
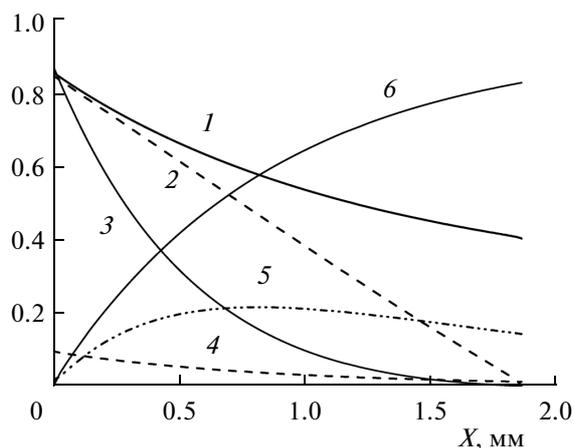


Рис. 6. Зависимость скорости детонации от обратного диаметра заряда для смесей ПХА (8 мкм) с 5 и 10% Al (7 мкм); плотность заряда –  $1.1 \text{ г/см}^3$ , целлофановая оболочка; значки – эксперимент [5], линии – расчет; 1 – 10% Al, 2 – 5% Al.

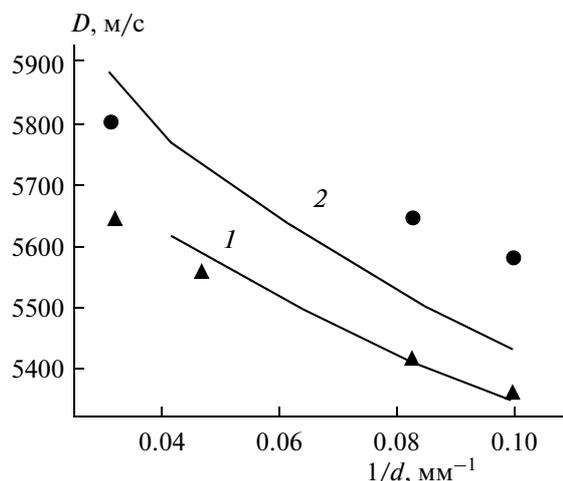


**Рис. 7.** Изменение характеристик течения и концентраций реагентов вдоль зоны реакции детонационной волны. Пример расчета для смеси ПХА + 10% Al; плотность заряда –  $1.1 \text{ г/см}^3$ , скорость детонации –  $3850 \text{ м/с}$ ,  $n = 1$ ,  $G_1 = 0.43 \text{ мкс}^{-1}$  для ПХА и  $G_1 = 0.6 \text{ мкс}^{-1}$  для Al;  $l$  – давление,  $2$  –  $\text{Ma}^2$ ; концентрации:  $3$  – продукты разложения ПХА,  $4$  – конечные продукты детонации смеси,  $5$  – ПХА,  $6$  – алюминий.

на–Жуге ПХА сгорает почти полностью, а из 10% Al сгорает 8.3%. Потери, связанные с расширением трубки тока, составляют ~ 4% и растут при уменьшении диаметра заряда (скорости детонации). К сожалению, между смесями с 10 и 5% алюминия имеется лишь небольшая разница в скоростях детонации. Для более определенных выводов было бы полезно иметь данные для смесей с меньшим содержанием алюминия (1–2%) и частицами большего диаметра.

**Смесь НМ + ПХА.** Большой массив экспериментальных данных по скорости детонации, полученный в [3] при варьировании диаметра заряда, соотношения компонентов и размера частиц ПХА, создает благоприятную основу для надежного определения скоростей химического превращения компонентов смеси. Для этого, однако, нужно провести большой объем расчетов. Мы пока находимся на начальной фазе анализа.

Расчеты проводились в предположении, что разложение НМ протекает с более высокими скоростями, чем горение ПХА. Анализ экспериментальных данных и некоторые оценки показывают, что различие в скоростях, по крайней мере в случае частиц небольшого диаметра, невелико. В качестве примера возьмем смесь 46% НМ + 54% ПХА с частицами диаметром 35 мкм. Объемная доля, приходящаяся на НМ, равна 0.6. Для ПХА, исходя из приведенных выше расчетов, с учетом возможного влияния размера частиц и объемной доли имеем  $n = 1$  и  $G_3$  по порядку величины  $G_3 = 0.05$ – $0.1 \text{ мкс}^{-1}$ . Для НМ используем данные по линейной скорости горения НМ при высоких давлениях [15] (по порядку величины  $U = 2 \text{ м/с}$

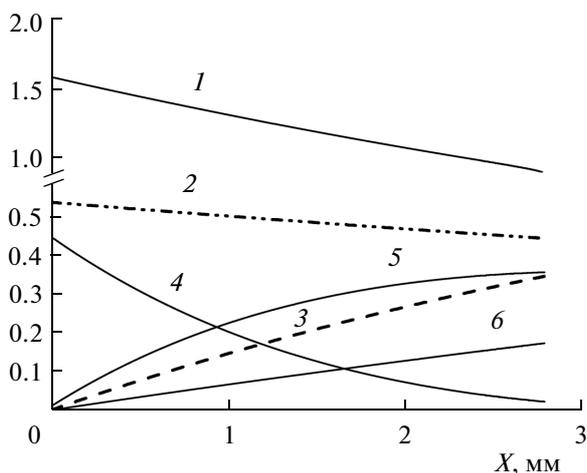


**Рис. 8.** Расчетные и экспериментальные [3] данные по зависимости скорости детонации от обратного диаметра заряда для двух смесей с разным содержанием ПХА:  $1$  – смесь 46% НМ + 54% ПХА (200 мкм), линия – расчет,  $\blacktriangle$  – эксперимент;  $2$  – смесь 61% НМ + 36% ПХА (200 мкм), линия – расчет,  $\bullet$  – эксперимент.

при давлении 1 ГПа и  $n$  от 1 и выше) и данные о том, что скорость детонационного превращения НМ в смесях с дисперсными добавками изменяется обратно пропорционально удельной поверхности добавки [10]. Оценивая удельную поверхность по формуле  $A_s = 4(1 - \phi)/d_0$ , получим, что по порядку величины  $G_1 = 0.15$ – $0.2 \text{ мкс}^{-1}$ .

При проведении расчетов пришлось принять во внимание, что скорости звука в стали (от 5.2 до 5.8 км/с, в зависимости от вида звуковых возмущений) лежат в диапазоне анализируемых скоростей детонации (5.0–6.8 км/с). Поэтому расчеты проводились по двум схемам: по модели с плоским фронтом детонации и инерционно расширяющейся оболочкой (схема 1) и модели с искривленным фронтом детонации и условием стыковки продуктов детонации и материала оболочки на боковой кромке заряда (схема 2). Условие стыковки определяется стандартным методом с использованием ударных и детонационных поляр.

Ниже даны результаты расчетов, целью которых было подобрать такие значения коэффициентов уравнения (25) для скорости химического превращения компонентов, при использовании которых расчетная зависимость скорости детонации от диаметра заряда для выбранной композиции была бы близка к экспериментальной. Пример сравнения расчета с экспериментом для смеси 46% НМ + 54% ПХА (200 мкм) дан на рис. 8. Расчет проведен по схеме 1 при  $n = 1$  и  $G_1 = 0.14 \text{ мкс}^{-1}$  для НМ и  $n = 0.2$  и  $G_1 = 0.85 \text{ мкс}^{-1}$  для ПХА. Показатель степени  $n$  по давлению для ПХА пришлось снизить, так как расчеты с  $n = 1$  дают более крутой наклон кри-



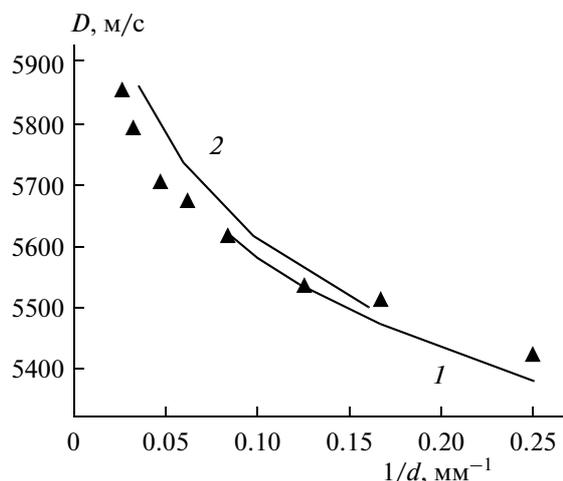
**Рис. 9.** Изменение характеристик смеси вдоль зоны реакции детонационной волны. Пример расчета для смеси 46% НМ + 54% ПХА (200 мкм); диаметр заряда – 12 мм, стальная оболочка, скорость детонации – 5410 м/с. Расчет по первому варианту при  $n = 0.2$ ,  $G_1 = 0.85 \text{ мкс}^{-1}$  для ПХА: 1 – давление в  $10^{-1}$  ГПа, 2 – скорость бокового расширения оболочки в км/с; концентрации: 3 – ПХА, 4 – НМ, 5 – продукты разложения НМ, 6 – конечные продукты детонации смеси.

вой, чем это наблюдается в эксперименте. Пример распределения основных характеристик течения в зоне реакции детонационной волны вдоль оси заряда приведен на рис. 9. Расчетная толщина зоны реакции – 2.8 мм, время пребывания – 0.73 мкс. За это время успевает сгореть почти весь НМ и только 9% из имеющихся 54% ПХА. Эффект бокового расширения канала оболочки не превышает 4%.

Попытка провести расчеты для смеси 61% НМ + + 39% ПХА (200 мкм), т.е., с меньшим содержанием дисперсной фазы, показана на рис. 8. Все входные коэффициенты, кроме содержания ПХА, остались прежними. Видно, что в расчете, как и в эксперименте, уменьшение содержания ПХА вызывает заметный рост скорости детонации, хотя расчетная зависимость скорости детонации от диаметра заряда для этой смеси оказалась более сильной, чем в опытах.

Результаты моделирования детонации для смеси 46% НМ + 54% ПХА (35 мкм), содержащей дисперсную фазу с гораздо меньшим размером частиц, приведены на рис. 10. Расчет проведен при  $n = 1$  и  $G_1 = 0.14 \text{ мкс}^{-1}$  для НМ и  $n = 0.2$  и  $G_1 = 2.9 \text{ мкс}^{-1}$  для ПХА по схеме 1 для скоростей детонации ниже 6000 м/с и по схеме 2 для скоростей детонации выше 6000 м/с. Для расчета ударной поляры использовали уравнение состояния в форме Мурнагана:

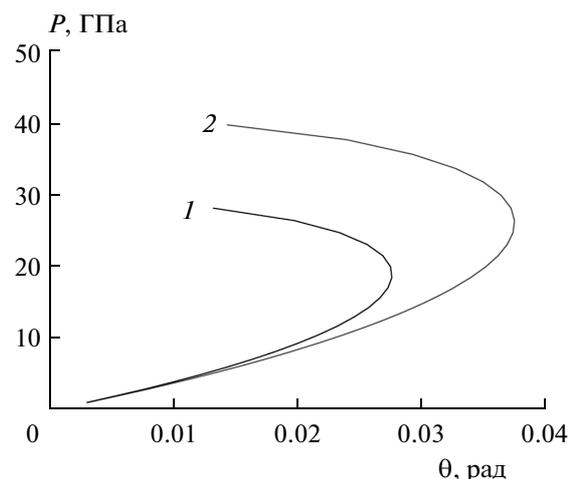
$$P(\text{ГПа}) = 22[(\rho/\rho_0)^{7.8} - 1]. \quad (34)$$



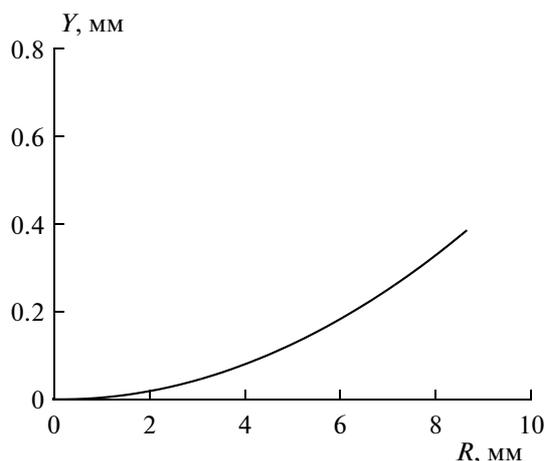
**Рис. 10.** Расчетные данные по первому и второму вариантам (1 и 2) и эксперимент (▲) [3] по зависимости скорости детонации от обратного диаметра заряда. Смесь 46% НМ + 54% ПХА (35 мкм).

Пример ударной поляры стали дан на рис. 11. Искомые углы отклонения потока на границе раздела между стальной оболочкой и детонирующей смесью, в зависимости от ожидаемого давления, лежат в диапазоне  $2.2-2.7^\circ$ . Пример формы фронта волны, рассчитанной с использованием этих данных, приведен на рис. 12.

Возвращаясь к рис. 10, отметим, что расчеты по обеим схемам дают приемлемое согласие с экспериментом по зависимости скорости детонации от диаметра заряда. По сравнению с расчетом, проведенным для крупнодисперсного порошка ПХА (200 мкм), константа  $G_1$  для скорости горения ПХА увеличена с 0.85 до  $2.9 \text{ мкс}^{-1}$ , т.е., в 3.4 раза, что меньше чем изменение диаметра ча-



**Рис. 11.** Ударная поляра стали, рассчитанная с использованием уравнения состояния (34). Скорость ударной волны равна 6000 и 6400 м/с.



**Рис. 12.** Форма фронта детонационной волны. Расчет для смеси 46% НМ + 54% ПХА (35 мкм). Скорость детонации – 6200 м/с, давление на фронте – 22.2 ГПа, диаметр заряда – 16.9 мм, угол  $\theta$  на кромке заряда – 3.21 град,  $R_c = 9.65$  мм,

стиц (в 5.7 раза). Следует, однако, иметь в виду, что фракции частиц ПХА, использованные в эксперименте, были полидисперсными, и приведенный средний размер может не соответствовать удельной поверхности порошков.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные трудности в разработке модели детонации тройных смесей заключается в отсутствии адекватных моделей гетерогенных химических взаимодействий, в том числе модели горения алюминия, а также в наличии значительных локальных неоднородностей давления и температуры в гетерогенной смеси, которые делают неопределенной кинетику даже гомогенных реакций (например, нитрометана). В связи с этим в настоящей работе пришлось опираться на экспериментальные зависимости скорости детонации от диаметра заряда и соотношения концентрация компонентов смеси для извлечения информации о скоростях химических реакций. Анализ основан на проведении численного моделирования и подборе значений коэффициентов, описывающих скорость химического превращения, при которых достигается хорошее согласие расчетов по всему массиву данных. Сравнение экспериментальных данных с термодинамическими расчетами служит хорошим ориентиром для определения эффективности реагирования компонентов.

Исследование, проведенное для чистого мелкодисперсного порошка ПХА и смесей ПХА и 5 или 10% Al, показало, что горение ПХА в детонационной волне (со скоростями детонации в диапазоне от 2300 до 4300 м/с) происходит достаточно быстро при ширине зоны реакции около 2 мм

и времени пребывания менее 1 мкс. При увеличении размера частиц ПХА скорость горения уменьшается в обратной пропорции размеру частиц, что подтверждает концепцию взрывного горения, заложенную в теоретическую модель. При увеличении плотности ПХА скорость горения снижается. Отсутствие ясной модели этого эффекта, к сожалению, ограничивает возможность переноса результатов анализ на другие условия.

Добавка мелкодисперсного порошка Al интенсифицирует горение, вызывая заметный рост скорости неидеальной детонации (притом, что для идеальной детонации ЧЖ расчетный прирост скорости выглядит гораздо скромнее). Результаты моделирования свидетельствуют о том, что при давлениях на уровне 5–15 ГПа времена горения мелкодисперсных порошков ПХА и Al с размером частиц не более 10 мкм лежат на уровне 1 мкс.

Анализ экспериментальных данных для смесей НМ с ПХА осложняется тем, что скорости звука в стали (материал оболочек) лежат в диапазоне измеренных скоростей детонации. Расчеты, проведенные в предположении, что НМ разлагается быстрее, чем ПХА, дали хорошее согласие с экспериментом для крупнодисперсного ПХА (200 мкм) как по зависимости скорости детонации от диаметра заряда, так и по влиянию содержания ПХА в смеси. Предварительные расчеты, проведенные для смеси с мелкодисперсным ПХА (35 мкм), показали, что для того чтобы получить согласие с результатами измерений, скорость горения ПХА нужно увеличить в 3.4 раза. При этом доля ПХА, сгоревшего в пределах зоны реакции детонационной волны, увеличилась от 1/5 до 1/2 от имеющейся в составе смеси, что обеспечило прирост скорости детонации в 500 м/с при равном диаметре заряда.

В настоящей работе представлена версия модели, которая в дальнейшем будет дорабатываться, чтобы сделать возможным более детальное объяснение наблюдаемых закономерностей.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Baudin G., Lefraçois A., Bergues B. et al. // Pros. XI (Intern.) Sympos. on Detonation. Arlington: ONR 33300-5, 1998. P. 989.
2. Kato Y., Murata K. // Proc. 34th Pyrotech. Sympos. "EUROPYRO 2007" V. 2. Puteaux: AFP, 2007. P. 957.
3. Pagnanini L. Doctorate These. France: Poitiers University–LCD–ENSMA, 2008.
4. Andersen W.H., Pesante R.E. // Proc. 8th Sympos. (Intern.) on Combustion. Baltimore: Williams and Wilkins Co., 1963. P. 705.
5. Price D., Clairmont A.R., Jr., Erkman J.O. // Combustion and Flame. 1973. V. 20. P. 389.
6. Имховик Н.А., Соловьев В.С. // Вестн. МГТУ. Сер. "Машиностроение". 1994. № 3. С. 50.

7. *Hobbs M.L., Baer M.R.* // Proc. 10th Intern. Detonation Sympos. Arlington: 1993. ONR 33395-12. P. 409.
8. *Ermolaev B.S., Khasainov B.A., Presles H.-N., Vidal P.* // Proc. Second European Combustion Meeting, 2005. <http://www.gfcombustion.asso.fr/index.php?langue=en&page=ecm.php&item=ecm>
9. *Ermolaev B.S., Khasainov B.A., Presles H.-N.* // Proc. 34th Intern. Pyrotech. Sympos. "EUROPYRO 2007". V. 1. Puteaux: AFP, 2007. P. 323.
10. *Khasainov B.A., Ermolaev B.S., Presles H.-N., Vidal P.* // Shock Waves. 1995. V. 6. P. 89.
11. *Swift D.C., Lambourn B.D.* // Proc. 10th Intern. Detonation Sympos. Arlington: ONR 33395-12, 1993. P. 386.
12. *Беляев А.Ф., Боболев В.К., Коротков А.И. и др.* Переход горения конденсированных систем во взрыв. М: Наука, 1973.
13. *Ermolaev B.S., Khasainov B.A., Presles H.-N., Vidal P.* // IY Symp. on High Dynamic Pressures. Paris: CEA, 1995. P. 65.
14. *Mader Ch.L.* Numerical modeling of detonations. // Berkley—LA—London: Univ. of California Press, 1979.
15. *Rice S.F., Foltz F.* // Combust. and Flame. 1991. V. 87. P. 109.