

ГОРЕНИЕ, ВЗРЫВ И УДАРНЫЕ ВОЛНЫ

УДК 532.5

ГЕНЕРИРОВАНИЕ ВЗРЫВНЫХ ВОЛН В КАНАЛЕ НЕИДЕАЛЬНОЙ ДЕТОНАЦИЕЙ ВЫСОКОПЛОТНЫХ СМЕСЕВЫХ СОСТАВОВ, ОБОГАЩЕННЫХ АЛЮМИНИЕМ

© 2009 г. А. А. Сулимов, А. А. Борисов, Б. С. Ермолаев, М. К. Сукоян,
В. Е. Храповский, П. В. Комиссаров

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

Поступила в редакцию 21.08.2008

Излагаются результаты экспериментальных исследований неидеальной детонации высокоплотных высокоэнергетических составов алюминий – перхлорат аммония – органическое горючее – ВВ и воздушных взрывных волн, возбуждаемых ею в канале. Составы, обогащенные алюминием, обладают высокими плотностями (до 2 г/см^3) и расчетной теплотой взрыва, почти вдвое превышающей соответствующую величину для тротила. Исследования проводились с целью разработки научных основ управления неидеальной детонацией и изучения возможности создания новых высокоэнергетических высокоплотных смесевых составов для повышения фугасного действия взрыва. Определены факторы, позволяющие управлять неидеальной детонацией таких зарядов. Показано, что при содержании гексогена выше 15% по аналогии с мощными бризантными ВВ скорость детонации линейно возрастает с ростом плотности, а критический диаметр детонации уменьшается. Путем изменения плотности, содержания ВВ, соотношения компонентов смеси удается регулировать скорость детонации высокоплотных зарядов в широком интервале: 4–7 км/с. Результаты измерений сопоставлены с термодинамическими расчетами скорости идеальной детонации. Для исследуемых композиций измерены профили давление–время взрывных волн, создаваемых в цилиндрической трубе расширяющимися продуктами детонации на различных расстояниях от заряда. Результаты измерений сопоставлены с аналогичными данными, полученными в тех же условиях при детонации зарядов тротила равной массы (100 г). По параметрам взрывных волн исследуемые составы значительно превосходят тротил: высокие значения на уровне 1.5–2, а в некоторых случаях и выше получены как для давления на фронте волны и импульса давления относительно тротила при равных расстояниях от заряда, так и для тротилового эквивалента взрыва при давлениях в волне 30–60 атм. Тротильные эквиваленты взрыва по давлению и импульсу изменяются с увеличением расстояния немоноотным образом, однако механизм, ответственный за такое поведение, остается не ясным. Показано, что в канале вклад реакции избыточного горючего с воздухом при расширении продуктов детонации во взрывную волну незначителен.

ВВЕДЕНИЕ

Распределение энергии при детонации зарядов обычных конденсированных ВВ в воздухе нельзя назвать оптимальным с точки зрения достижения высокой эффективности фугасного действия. Чрезмерно большие давления вблизи заряда приводят к существенным потерям за счет необратимого нагрева окружающей среды в ударной волне, начальная амплитуда которой значительно превышает величину, необходимую для разрушения и поражения большинства объектов. В качестве альтернативы рассматриваются неидеально детонирующие смесевые ВВ, применение которых открывает возможность снижать до разумных пределов давление детонации и растягивать во времени тепловыделение, оставляя его все же достаточно быстрым для того, чтобы задержанное тепловыделение успевало поддерживать взрывную волну.

Потенциально смесевые ВВ, в особенности ВВ с добавками алюминия, обладают высокой энергетикой. Кроме того, дополнительным и весьма значительным фактором повышения амплитуды и длительности взрывной волны может быть участие кислорода воздуха в окислении избыточного горючего компонента в продуктах детонации.

Интерес к смесевым композициям на основе бризантного ВВ, перхлората аммония и алюминия для создания высокоэффективных взрывных волн проявлялся и ранее. Однако, как показывают исследования [1], параметры взрывных волн, генерируемых неидеальной детонацией, зависят от большого числа различных факторов, и отсутствие надежной научной базы сильно затрудняет разработку эффективных композиций и поиск оптимальных условий их применения.

Исследование проведено на цилиндрических зарядах, изготавливаемых прессованием из четырех компонентных смесей перхлората аммония, алю-

миния, гексогена и органического горючего. В статье приводятся экспериментальные данные по скорости детонации и критическим условиям детонации смесевых композиций и результаты измерения параметров воздушных взрывных волн. При выборе исследуемых композиций учитывались результаты термодинамических расчетов. Воздушные взрывные волны генерировали в канале цилиндрической трубы длиной 4 м. Выбранные условия взрывных экспериментов позволяют свести к минимуму возможное участие кислорода окружающего воздуха в реагировании горючего компонента смеси. Кроме того, при распространении в трубе взрывная волна затухает гораздо медленнее, чем при взрыве в открытом пространстве, что облегчает измерение параметров взрывной волны в средней зоне взрыва, т.е. при амплитудах волны порядка нескольких десятков атмосфер.

В данной работе исследуется неидеальная детонация в высокоплотных смесевых системах перхлорат аммония (ПХА) – алюминий (Al) – парафин (П) – гексоген (Г). Кроме того, проведено измерение параметров воздушных взрывных волн, возбуждаемых в канале, которые дают представление об эффективности использования химической энергии, запасенной в смеси.

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ ПАРАМЕТРОВ ДЕТОНАЦИИ

Термодинамические расчеты параметров детонации, состава продуктов и изоэнтроп расширения помогают составить общее представление о потенциале исследуемых композиций. Методы расчета опираются на классическую науку о термодинамике и уравнения сохранения, таблицы термодинамических свойств химических соединений и правило отбора Чепмена–Жуге для скорости детонации (наиболее надежные элементы расчетов), а также на уравнение состояния продуктов детонации. Применительно к продуктам детонации конденсированных смесевых ВВ уравнение состояния остается наименее надежным элементом расчета и используется преимущественно в различных приближенных формах, которые носят полуэмпирический характер.

Уравнение состояния ВКВ применяется для ВВ разных классов и входит в ряд известных термодинамических и газодинамических компьютерных программ. Уравнение включает четыре подгоночных коэффициента, значение которых подбирают, стараясь получить наилучшее согласие расчетов с экспериментальными данными. Чаще всего для калибровки используют экспериментальные данные по скорости детонации и по метанию оболочки. Некоторые исследователи вносили поправки, чтобы улучшить согласие по давлению детонации, температуре и составу про-

дуктов. С этой целью, помимо упомянутых выше четырех коэффициентов, варьировали также коволюмы некоторых газов – продуктов реакции. Два набора, ВКWR и ВКWS, дают удовлетворительное согласие по детонационным характеристикам сразу для широкого круга ВВ различных классов и начальной плотности. Набор ВКWR предсказывает более низкие температуры детонации; соответственно, состав продуктов содержит больше высокомолекулярных газов.

Расчеты параметров детонации Чепмена–Жуге, состава продуктов и изоэнтроп равновесного расширения проводились по программе ДНИ-ТЕРМ [2] с использованием набора ВКWR. Исходными параметрами для расчета являются химические формулы и стандартные энтальпии образования компонентов, массовые концентрации компонентов в смеси и плотность смеси. При наличии в смеси инертных компонентов, не участвующих в химической реакции, требуются данные по их плотности и коэффициентам ударной адиабаты. Теплота взрыва определялась как разность между энтальпией образования смеси и энтальпией продуктов детонации, взятой при комнатной температуре и атмосферном давлении. Идеальная работа расширения определялась по формуле

$$A = E_{CJ} - E(P_{atm}) - u_{CJ}^2/2 - \Delta E_{1500}. \quad (1)$$

Здесь E_{CJ} – внутренняя энергия продуктов детонации в точке Чепмена–Жуге, $E(P_{atm})$ – внутренняя энергия продуктов детонации после расширения до атмосферного давления, третий член в правой части равен приросту внутренней энергии при сжатии рассматриваемой смеси от начального состояния до состояния в точке Чепмена–Жуге. Известно, что сохранение равновесия в продуктах детонации до их полного расширения завышает значение идеальной работы, поэтому при проведении расчетов по расширению продуктов детонации рекомендуется вводить условие “замораживания” состава продуктов при температурах ниже некоторого порогового значения (обычно 1800–1500 К). В наших расчетах для учета этого эффекта в формулу (1) введена поправка ΔE_{1500} , численно равная разности между энтальпиями образования равновесных продуктов реакции, которые рассчитывали вдоль изоэнтропы при температуре 1500 К и при полном расширении до атмосферного давления. Следует, однако, отметить, что для рассматриваемых смесевых композиций характерна высокая “остаточная” температура при расширении продуктов до атмосферного давления. Как следствие, поправка ΔE_{1500} имела небольшую величину и ею можно было пренебречь. На рис. 1 и 2 приведены результаты расчетов теплоты взрыва и идеальной работы расширения продуктов для композиций X%Al+ (77 – X)%ПХА +

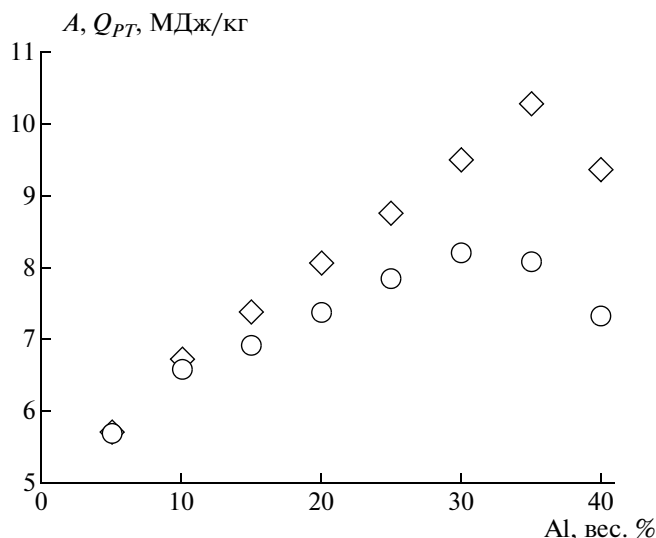


Рис. 1. Расчетные значения идеальной работы расширения продуктов взрыва (A) и теплоты взрыва (Q_{PT}) исследуемых композиций ($X\%Al + (77 - X\%)ПХА + 3\%П + 20\%Г$) в зависимости от содержания алюминия при $\delta = 0.9$: $\circ - A$, $\diamond - Q_{PT}$. Программа Dnitem, уравнение состояния ВКWR.

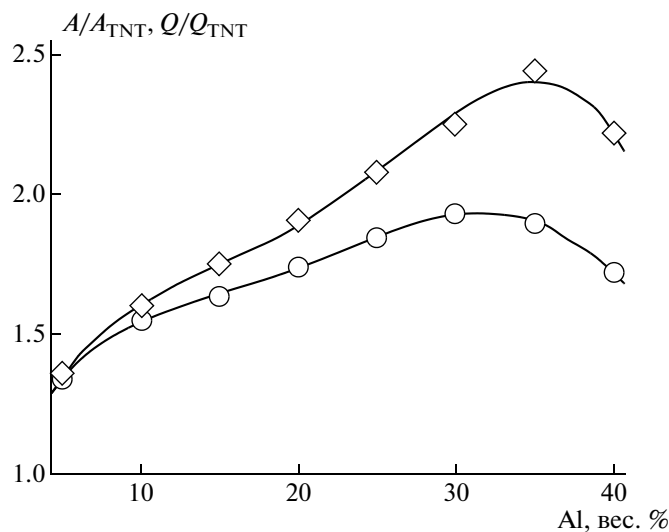


Рис. 2. Сравнительная диаграмма, построенная с использованием данных рис. 1. и демонстрирующая энергетическую эффективность детонации исследуемых смесей по отношению к тротилу, $\delta = 0.9$. Программа Dnitem, уравнение состояния ВКWR.

+ 3%П + 20%Г в зависимости от содержания алюминия. Расчеты проводились при относительной плотности заряда, равной 0.9. Как видно из этих расчетов, при больших содержаниях алюминия кривая для работы расширения идет заметно ниже кривой для теплоты взрыва, что связано с высокой остаточной температурой расширившихся продуктов. Видно, что работа расширения продуктов имеет максимум при содержании алюминия 20–30%, что превышает стехиометрическое значение. По отношению к тротилу работа расширения продуктов детонации смесей в данном диапазоне содержания алюминия превышает аналогичную величину для тротила в 1.7–1.9 раза, а по теплоте взрыва – в 2.0–2.3 раза. Отметим, что плотность смеси в этом диапазоне выше плотности тротила на 24–27%.

Таким образом, продукты детонации исследуемых смесей обладают высокой работоспособностью, что обусловлено высокой энергией, существенно перекрывающей обратный эффект, вызванный снижением объема газовой фазы за счет образования твердого окисла алюминия. Следует напомнить, что в расчетах учитывалась только энергия, выделяющаяся за счет реакции между компонентами смеси. С учетом возможного окисления избыточного горючего кислородом воздуха характеристики смеси окажутся еще более высокими.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Объекты исследования

Исследовались высокоплотные прессованные заряды из высокоэнергетических смесевых составов на основе перхлората аммония и алюминия, реагирующие в режиме неидеальной детонации. Использовали мелкодисперсные порошки алюминия, ПХА и гексогена заводского производства. В качестве органического инертного горючего – газпровайдера в основной серии опытов нами использовался парафин. Кроме парафина, исследовались также другие порошкообразные полимеры типа полиметилметалкрилата, тефлон и графит. Гексоген выполнял роль сенсibilизатора и обеспечивал устойчивое распространение детонации. Дисперсность ПХА составляла 20 мкм, гексогена – 50–70 мкм. Использовался чешуйчатый алюминий марки ПАП-2 с частицами толщиной 1.2 мкм и удельной поверхностью около 7000 см²/г. Смесь алюминия, ПХА и гексогена тщательно перемешивали, после чего вводили парафин, растворенный в бензине; последний удаляли в процессе сушки.

Композиции для исследования были выбраны с учетом результатов термодинамических расчетов. Композиции обогащены алюминием и включали 21–26% алюминия, 3–6% парафина и 15–35% гексогена, остальное приходилось на ПХА. Составы на основе ПХА, обогащенные алюминием и содержащие добавки ВВ и органических горючих различной природы, обсуждались в [1] и защищены патентами на изобретение [3, 4].

Детонационная способность

Детонация смесей, содержащих бризантное ВВ, ПХА и алюминий, как правило, распространяется с пониженными скоростями и параметрами на фронте волны (см., например, обзор в [5]). Для этих смесей характерно многостадийное химическое превращение, в ходе которого в зоне реакции детонационной волны выделяется небольшая часть энергии (в основном за счет разложения взрывчатого сенсibilизатора), тогда как более медленные экзотермические процессы (горение алюминия в продуктах разложения ПХА) протекают за поверхностью Чепмена–Жуге, в зоне расширения реагирующих продуктов.

Результаты исследования детонационной способности рассмотрим на примере смесей алюминия, перхлората аммония, гексогена и парафина. В опытах измеряли скорость детонации и критическую толщину детонирующего слоя. Чтобы получить более привычный параметр – критический диаметр детонации цилиндрического заряда, критическую толщину нужно умножить на два. Скорость детонации измеряли фотографическим методом с помощью ждущего фоторегистра ЖФР-3. Цилиндрические заряды без оболочки, собранные из 7–8 прессованных таблеток, имели диаметр 20 мм и длину 140–150 мм. Для определения критической толщины слоя применяли ступенчатые плоские заряды, располагаемые на дюралевой подложке. Заряды состояли из пяти секций размером 50 × 20 мм; толщина секций уменьшалась от начала к концу заряда. Детонацию инициировали капсюлем-детонатором без переходного заряда. Изучалось влияние относительной плотности заряда, которая варьировалась в диапазоне 0.75–0.95, соотношения компонентов смеси и содержания гексогена на характеристики детонации.

Результаты измерений представлены на рис. 3–5 для композиций, содержащих 26% алюминия и 3% парафина. Рисунок 3 иллюстрирует зависимость скорости детонации от относительной плотности заряда для двух составов, в которых содержание гексогена (30 и 20% соответственно) изменялось за счет содержания ПХА. Рисунок 4 иллюстрирует зависимость скорости детонации от содержания гексогена. Здесь для сравнения вместе с экспериментальными данными приведены результаты термодинамического расчета. Наконец, на рис. 5. приведена зависимость критической толщины детонирующего слоя от относительной плотности заряда для состава с 30% гексогена.

Суммируем полученные результаты.

1. При содержании гексогена 15% и выше параметры детонации исследованных смесевых составов изменяются аналогично мощным бризантным ВВ: с ростом плотности скорость дето-

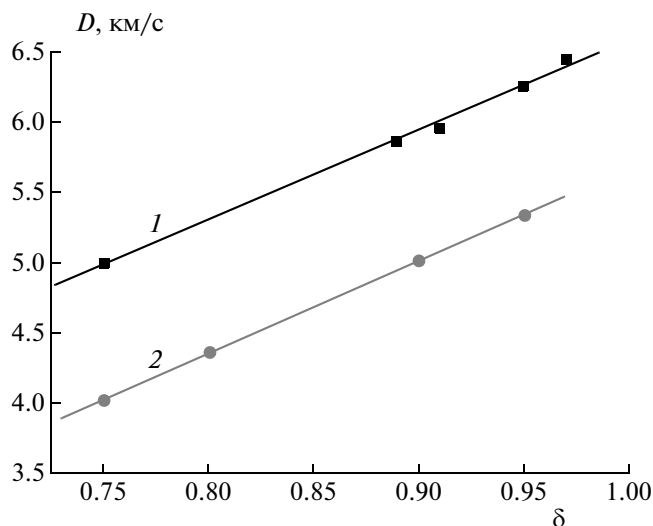


Рис. 3. Экспериментальная зависимость скорости детонации от относительной плотности заряда: 1 – состав 26%Al + 41%ПХА + 3%П + 30%Г, 2 – состав 26%Al + 51%ПХА + 3%П + 20% Г.

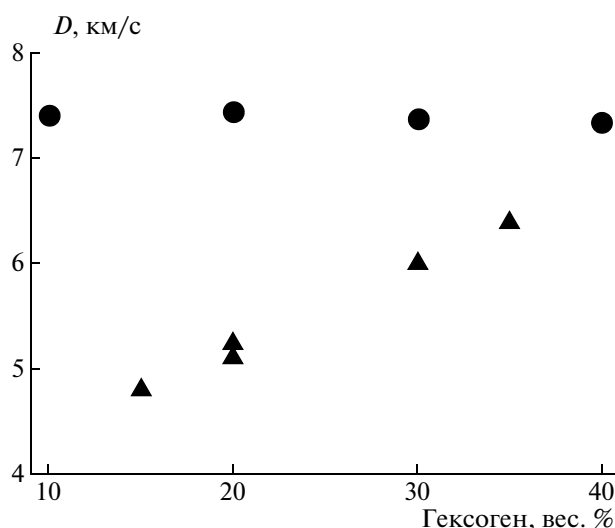


Рис. 4. Зависимость скорости детонации от содержания гексогена: ● – термодинамический расчет, ▲ – эксперимент. Состав 26%Al + (71 – X)%ПХА + 3%П + X%Г.

нации линейно увеличивается, а критический диаметр детонации (толщина слоя) уменьшается и при относительной плотности 0.9 составляет всего несколько миллиметров.

2. При увеличении содержания гексогена в смеси измеренная скорость детонации линейно растет, однако остается значительно ниже расчетной термодинамической скорости детонации Чепмена–Жуге. Разность между расчетной и экспериментальной скоростью детонации исследуемых смесей составила 2600 м/с при содержании

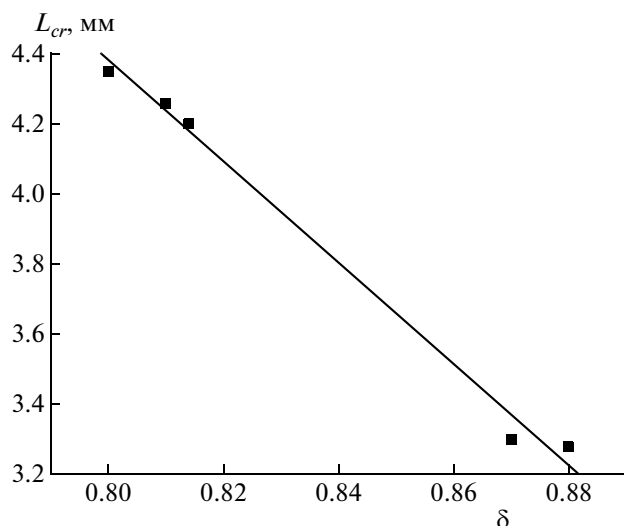


Рис. 5. Зависимость критической толщины детонирующего слоя от относительной плотности заряда для состава 26%Al + 41%ПХА + 3%П + 30%Г.

гексогена 15% и около 900 м/с при 35% гексогена соответственно.

3. По совокупности характеристик в качестве базового состава для изучения параметров взрывных волн была выбрана композиция, состоящая из 26% алюминия, 51% ПХА, 3% парафина и 20% гексогена. Основные детонационные характеристики этой смеси при относительной плотности 0.9 следующие: скорость детонации для заряда без оболочки диаметром 20 мм – 4.9 км/с, расчетная теплота взрыва – 2100 ккал/кг, критический диаметр детонации – 15 мм и критическое давление инициирования детонации – 25 кбар.

Воздушные взрывные волны, генерируемые в цилиндрической трубе

Для определения параметров взрывных волн при расширении продуктов детонации в цилиндрической трубе была разработана установка,

позволяющая проводить измерения профилей давление–время на различных расстояниях от заряда. Схема установки дана на рис. 6. Заряд 2 располагался у закрытого торца трубы горизонтально и состоял из скрепленных между собой прессованных таблеток исследованной смеси диаметром 23 мм и весом 92 г и промежуточного детонатора – бустера 3. В качестве бустера использовали таблетки тротила весом 8 г и плотностью 1.5 г/см³, изготовленные прессованием, с отверстием под капсюль ЭД-8. Общий вес заряда был равен 100 г, и так же, как и вес бустера, оставался одинаковым во всех опытах. Собранный заряд обматывали по боковой поверхности полимерной лентой и размещали в прочной зарядной камере 1 из термообработанной стали 30ХГСА с внутренним диаметром 60 мм и толщиной стенки 30 мм. Заряд центрировался с помощью вставок 4. Зарядная камера 1 устанавливалась в трубе на расстоянии 130 мм. Упор 7 предотвращал движение камеры. Длина заряда с капсюлем-детонатором составляла около 120 мм. Детонацию заряда инициировали от закрытого торца камеры.

Продукты детонации истекали из зарядной камеры в канал, представляющий собой стальную трубу 5 внутренним диаметром 120 мм с толщиной стенки 15 мм и длиной 400 см; торец трубы со стороны, противоположной заряду, был открытым. Оси заряда и трубы совпадали. По длине трубы располагались пять высокочастотных пьезокварцевых датчиков давления (6) марки “Kistler” на различных расстояниях (L) от правого, открытого торца заряда, равных, как правило, 80, 130, 180, 255 и 330 см. Сигналы с датчиков через зарядовый усилитель регистрировались быстродействующим аналого-цифровым преобразователем.

Результаты для исследуемых составов сопоставлялись с данными для зарядов мелкодисперсного прессованного тротила плотностью 1.5 г/см³ той же массы (100 г) на одинаковых расстояниях от заряда. Это позволило дать наглядную характеристику эффективности исследуемых смесей в

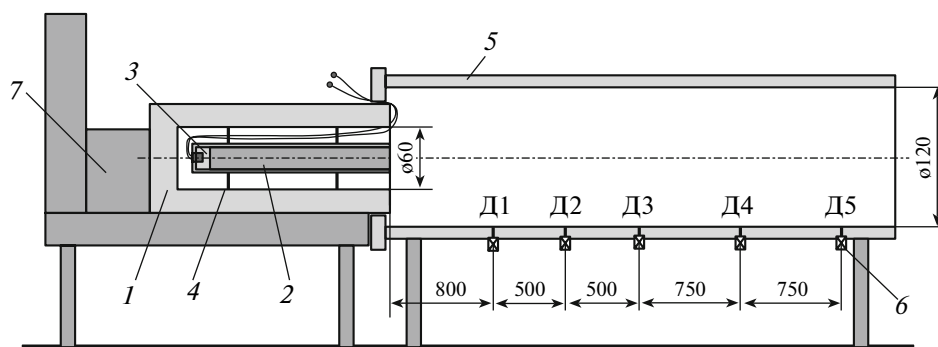


Рис. 6. Схема установки «цилиндрическая труба» для измерения параметров взрывных волн при расширении продуктов детонации.

Характеристики исследованных зарядов и экспериментальные результаты

Номер состава	Состав	K, %	Плотность заряда, г/см ³	Параметры взрывной волны в трубе				
				L, см	P, атм	I, атм · мс	P/P _{TNT}	I/I _{TNT}
A1	21% Al + 53% ПХА + + 6% П + 20% Г	-25.6	1.76 (0.92)	80	88	84	1.93	1.95
				130	70	55	1.88	1.47
				180	52	40	1.6	1.24
				255	38	—	1.45	—
				330	34	40	1.6	2.1
A2	26% Al + 48% ПХА + + 6% П + 20% Г	-32	1.8 (0.93)	130	61	90	1.63	2.12
				180	51	62	1.54	1.9
				255	37	44	1.45	1.77
				330	27	19.5	1.27	1.1
A3	24% Al + 53% ПХА + + 3% П + 20% Г	-18	1.8 (0.9)	80	75	74	1.67	1.66
				130	71	39	1.89	1.01
				180	61	51	1.87	1.57
				255	41	35	1.6	1.46
				330	29	45	1.37	2.39

Примечание: K – кислородный баланс.

сравнении с тротилом (TNT), используя относительные значения избыточного давления на переднем фронте волны (P/P_{TNT}) и импульса давления (I/I_{TNT}), а также определить величину тротилового эквивалента. Опыты проводили с составами, различающимися соотношением компонентов, которое изменялось за счет вариации содержания алюминия, ПХА и парафина при неизменном содержании гексогена, равном 20%. Характеристики исследованных зарядов даны в таблице. Составы имели отрицательный кислородный баланс за счет избыточного металлического горючего.

Примеры получаемых осциллограмм давление–время $p(t)$ представлены на рис. 7 в двух видах: в исходном виде и после того, как исходный сигнал был подвергнут процедуре сглаживания. Из этих осциллограмм определялись давление на переднем фронте ударной волны (давление на фронте корректировали, используя известное соотношение между скоростью и давлением воздушной ударной волны [6]) и импульс давления интегрированием зависимости $p(t)$. Полученные результаты для исследованных составов приведены в таблице и на рис. 9–12.

На рис. 8 приведены экспериментальные профили давление–время взрывных волн, образующихся при детонации заряда тротила, и на рис. 9 – полученные осреднением по трем параллельным опытам зависимости избыточного давления на переднем фронте и импульса давления от расстояния до заряда. Значения относительных давлений на переднем фронте (P/P_{TNT}) и импульсов давления (I/I_{TNT}) приведены в таблице.

Кроме того, принимая во внимание широкую распространенность такой характеристики взрыва, как тротиловый эквивалент, мы определяли тротиловые эквиваленты взрыва по давлению и импульсу. Метод оценки тротиловых эквивалентов взрыва основан на принципе моделирования Садовского [7], согласно которому при увеличении энергии (или массы) заряда в k раз метрические и временные характеристики взрывной волны при одинаковой амплитуде волны увеличиваются как корень кубический из k . Принцип моделирования установлен для взрывных волн в открытом пространстве. При взрыве в трубе вместо корня кубического из k метрические и временные характеристики взрывной волны должны увеличиваться пропорционально k [8].

Применительно к нашим опытам, для определения тротилового эквивалента по давлению (соответствующая величина обозначена как E_{TNT}^P) можно использовать отношение расстояний, на которых исследуемый заряд и заряд тротила равной массы создают волну одинаковой амплитуды. При определении тротилового эквивалента по импульсу (E_{TNT}^I) используется аналогичная процедура, с тем отличием, что вместо одинаковых амплитуд волны следует взять одинаковые отношения импульса к расстоянию.

На рис. 10 даны полученные результаты для составов A1, A2, A3. В качестве примера рассмотрим подробнее данные для состава 24%Al + 53%ПХА + 3%П + 20%Г (состав A3). Результаты измерений давления на переднем фронте и

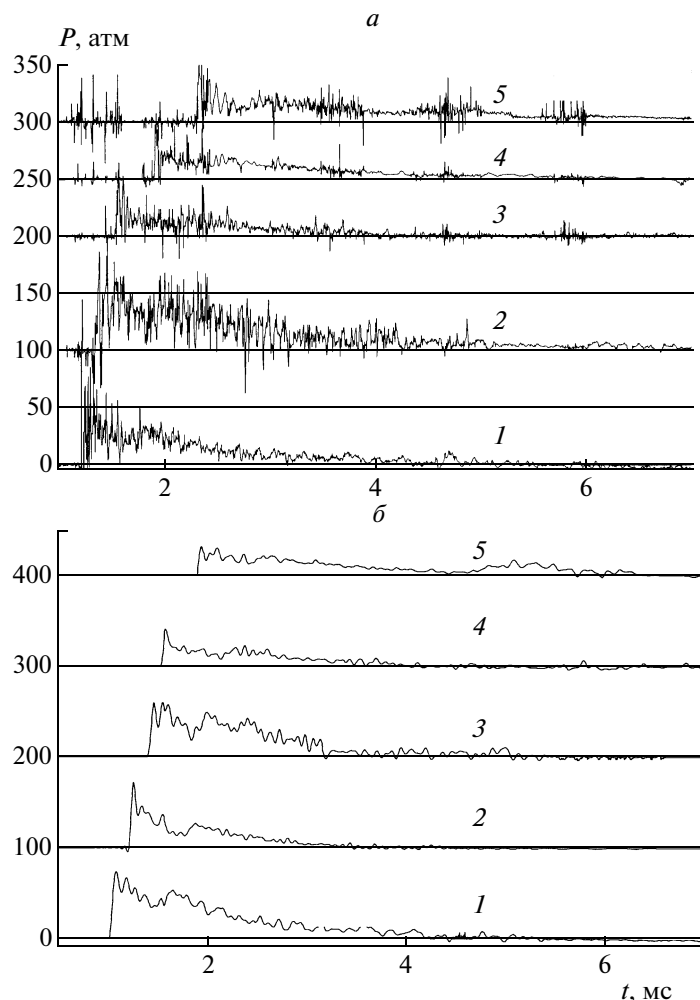


Рис. 7. Экспериментальные профили давление — время для взрывных волн в цилиндрической трубе, образующихся при детонации заряда состава АЗ плотностью 1.8 г/см^3 : *a* — исходные записи, *б* — записи, сглаженные по 10 точкам. Обозначения: 1 — Д1, $L = 80 \text{ см}$; 2 — Д2, $L = 130 \text{ см}$; 3 — Д3, $L = 180 \text{ см}$; 4 — Д4, $L = 250 \text{ см}$; 5 — Д5, $L = 330 \text{ см}$.

импульса давления взрывной волны на различных расстояниях от заряда представлены на рис. 10. Относительные амплитуды и импульсы, а также тротильные эквиваленты взрывной волны, полученные для этого опыта на различных расстояниях от заряда, приведены на рис. 11. Эти же данные, представленные в зависимости от давления на переднем фронте (а не от расстояния), приведены на рис. 12.

Как следует из приведенных данных, исследуемая смесь по характеристикам взрывной волны значительно превосходит тротил. В диапазоне расстояний, превышающих 1.5 м, и при давлениях на переднем фронте волны в диапазоне 30–60 атм относительные значения амплитуды волны составляют 1.4–1.9, а значения тротильного эквивалента по давлению даже превышают 2.0. Высокие значения на уровне 1.5–2.4 наблюдаются для относительного импульса давления. Причем, если относительные характеристики по давлению де-

монстрируют максимум при расстояниях 1.3–2.5 м, то характеристики по импульсу имеют тенденцию к росту по мере увеличения расстояния, пройденного волной. Полученные результаты означают, что высокая энергетика смеси эффективно переходит в энергию взрывной волны. Отметим, что измеренные параметры взрывных волн, в том числе тротильные эквиваленты взрыва по давлению и импульсу, изменяются с расстоянием немонотонным образом, однако механизм, ответственный за такое поведение, остается неясным.

Что касается возможного участия кислорода воздуха в окислении горючих компонентов в продуктах, то нетрудно убедиться, что его участие не может быть существенным. Действительно, за время прохождения волны до конца трубы, равное около 2 мс, оцененная длина пути кислорода воздуха в продукты благодаря молекулярной диффузии при давлении на контактной поверхности

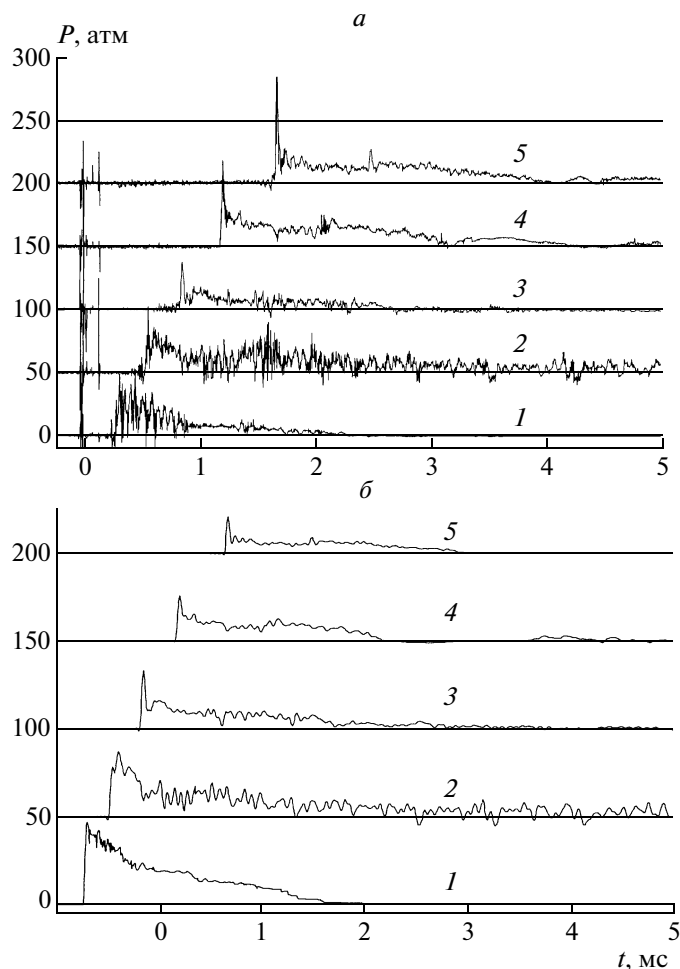


Рис. 8. Экспериментальные профили давление – время для взрывных волн в цилиндрической трубе, образующихся при детонации заряда тротила плотностью 1.5 г/см^3 : *а* – исходные записи, *б* – записи, сглаженные по 10 точкам. Обозначения: 1 – Д1, $L = 80 \text{ см}$; 2 – Д2, $L = 130 \text{ см}$; 3 – Д1, $L = 180 \text{ см}$; 4 – Д4, $L = 250 \text{ см}$; 5 – Д5, $L = 330 \text{ см}$.

и температуре продуктов оказывается менее 1 мм, но при этом фронт ударной волны находится уже на расстоянии 3.3 м, а размер столба продуктов, расширившихся к этому времени, порядка 3.3 м, а размер столба продуктов, расширившихся к этому времени, порядка 2.5 м. Таким образом, молекулярная диффузия может дать пренебрежимо малый вклад в тепловыделение за фронтом волны. Несомненно, при высоких числах Рейнольдса потока за фронтом должен возникнуть турбулентный пограничный слой, который должен увеличить массообмен, однако, как следует из наблюдений в ударных трубах [9], размер пограничного слоя составляет несколько миллиметров, а “размытие” контактной поверхности благодаря ее искривлению и турбулентности не превышает 20% от размера ударно-сжатого газа (который в нашем случае составляет только

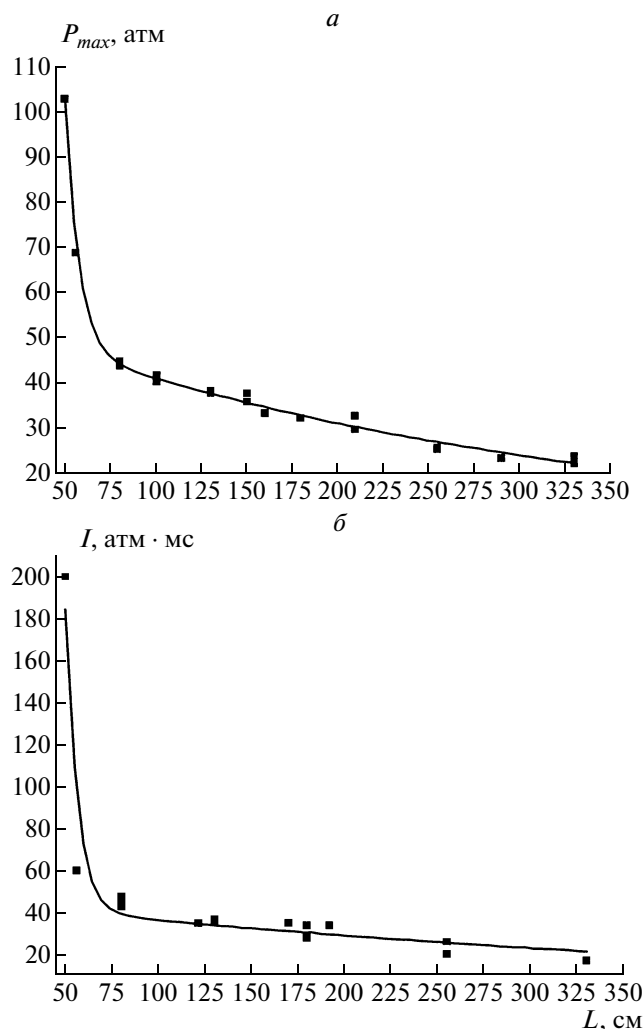


Рис. 9. Зависимости давления на переднем фронте (*а*) и импульса давления (*б*) от расстояния до заряда для зарядов тротила весом 100 г и плотностью 1.5 г/см^3 . Установка “цилиндрическая труба”.

30% от размера столба расширившихся продуктов). Поскольку металл с кислородом воздуха может реагировать только в слое смешения, размер которого грубо оценен сверху, ясно, что вклад этой реакции в распространение волны будет малым. Хотя эти данные получены при низких начальных давлениях в трубах в наших условиях не следует ожидать сильных отклонений от вышеприведенных оценок, поскольку при повышении давления пограничный слой не увеличивается. Таким образом, и турбулентный массообмен не способен обеспечить существенную подпитку ударной волны благодаря реакции избыточного металлического горючего с кислородом воздуха.

Опыты с составами А1 и А2 (см. таблицу и рис. 10) проведены на смесях с более высоким содержанием горючих компонентов (кислородный ба-

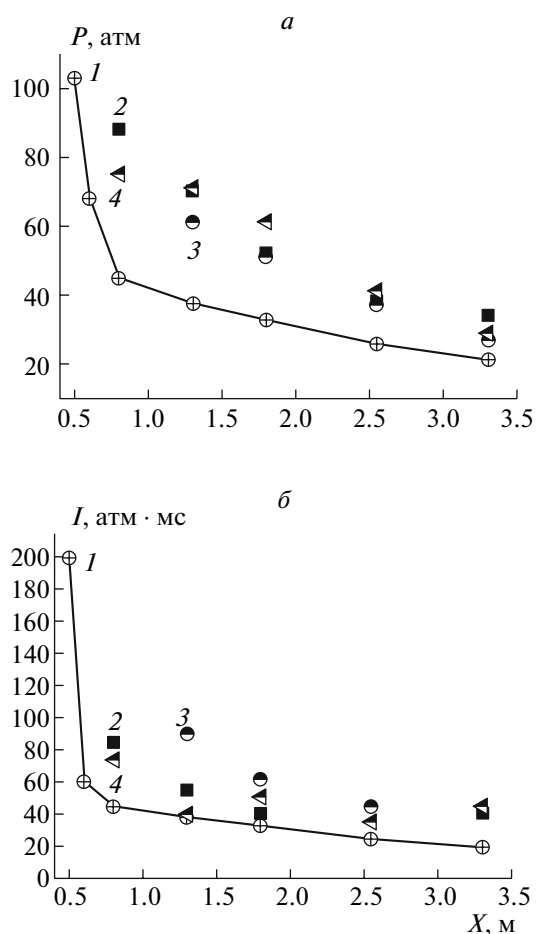


Рис. 10. Давление на переднем фронте (а) и импульс давления (б) в зависимости от расстояния до заряда для исследуемых смесей и тротила. Установка "цилиндрическая труба". Обозначения: 1 – тротил, 2 – состав А1, 3 – состав А2, 4 – состав А3.

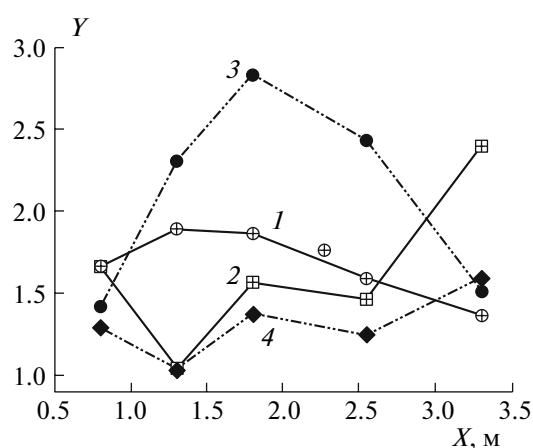


Рис. 11. Относительные величины давления на переднем фронте, импульса давления и тротильных эквивалентов по давлению и импульсу в зависимости от расстояния до заряда. Состав А3. Обозначения: 1 – P/P_{TNT} , 2 – I/I_{TNT} , 3 – E_{TNT}^P , 4 – E_{TNT}^I .

ланс: -26% и -32% соответственно) при том же содержании гексогена 20%. Результаты этих опытов и сравнение их с результатами опыта с А3 (кислородный баланс равен -18%) показывают следующее. В целом, несмотря на то, что в опытах в трубе фактически отсутствует возможность догорания избыточного металлического горючего в кислороде воздуха, все исследованные смеси генерируют взрывные волны, более интенсивные, чем при взрыве тротила, вследствие более высокой энергетики составов. Составы А1 и А3 демонстрируют близкие зависимости характеристик взрывной волны от расстояния и, в частности, рост относительного импульса волны при увеличении расстояния в диапазоне 1.5 до 3.3 м. В отличие от них состав А2 показывает тенденцию к уменьшению относительного импульса волны на этом участке трубы, что, возможно, отражает эффект избытка горючих компонентов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Составы на основе ПХА, обогащенные алюминием и сенсibilизированные добавкой бризантного ВВ, обладают высокими плотностями (до 2 г/см^3), и по энергетике почти вдвое превосходят тротил. Такие составы обладают способностью детонировать в неидеальном режиме, т.е. со скоростями и давлениями на фронте, существенно меньшими, чем ожидаемые идеальные значения.

Проведенные измерения показали, что посредством изменения таких параметров, как относительная плотность заряда, содержание взрывчатого ВВ, используемого в качестве сенсibilизатора, и соотношения остальных компо-

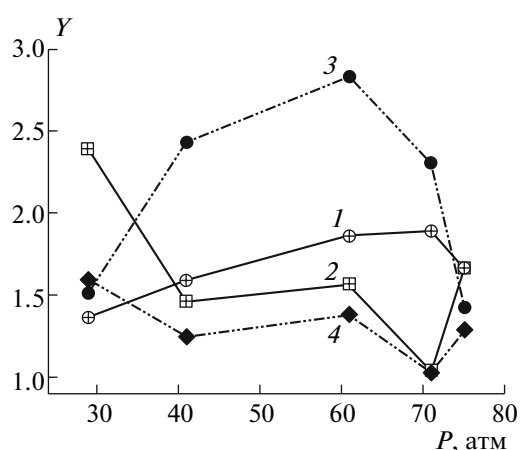


Рис. 12. Относительные величины давления на переднем фронте, импульса давления и тротильных эквивалентов по давлению и импульсу в зависимости от давления во фронте волны. Состав А3. Обозначения: 1 – P/P_{TNT} , 2 – I/I_{TNT} , 3 – E_{TNT}^P , 4 – E_{TNT}^I .

нентов смеси, удастся регулировать скорость детонации высокоплотных зарядов в широком интервале: от 4 до 7 км/с. При содержании ВВ (гексогена) свыше 15% исследуемые составы ведут себя аналогично мощным бризантным ВВ, демонстрируя линейный рост скорости детонации и уменьшение критического диаметра детонации с ростом плотности заряда. Сравнение с термодинамическими расчетами показывает, что при детонации исследованных составов до поверхности Чепмена–Жуге выделяется только часть энергии, которая приблизительно соответствует разложению гексогена. Теоретически, при эффективном использовании остальной части энергии, выделяющейся в волне разрежения, открывается возможность существенно повысить параметры взрывной волны, по крайней мере в средней зоне взрыва, т.е. при амплитуде взрывной волны в диапазоне нескольких десятков атмосфер.

Измерения параметров взрывных волн, создаваемых в цилиндрической трубе расширяющимися продуктами детонации высокоплотных зарядов, показали высокую эффективность композиций, детонирующих в неидеальном режиме, для указанного диапазона амплитуд волны. Результаты измерений сравнивались с аналогичными данными, которые были получены в той же постановке для зарядов тротила равной массы. В качестве характеристик эффективности взрыва рассмотрены давление на переднем фронте волны и импульс давления, отнесенные к соответствующим величинам для тротила при равном расстоянии от заряда (P/P_{TNT} и I/I_{TNT}), а также тротиловые эквиваленты взрыва по давлению и импульсу. На примере составов на основе ПХА с 20% гексогена, 21–26% мелкодисперсного алюминия и 3–6% парафина показано, что исследованные смеси генерируют взрывные волны, способные сохранять амплитуду в диапазоне 30–60 атм на гораздо больших расстояниях, чем вол-

ны при детонации тротила. При этом относительные величины давления и импульса на разных расстояниях от заряда составляли 1.4–2.8 и до 2 соответственно.

Изменения с увеличением расстояния тротиловых эквивалентов взрыва по давлению и импульсу носят немонотонный характер, однако механизм такого изменения требует дальнейшей проработки. Показано, что вклад реакции избыточного горючего с воздухом при расширении продуктов детонации во взрывную волну незначителен.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российским фондом фундаментальных исследований (проекты № 06-03-32097 и № 09-03-00229а) и Программой № 5 Отделения химии и наук о материалах РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сулимов А.А., Сукоян М.К., Борисов А.А. и др. // Материалы 3-й Всерос. конф. “Энергетические конденсированные системы”. Черноголовка: ИПХФ РАН, 2006. С. 118.
2. Имховик Н.А., Соловьев В.С. // Вестн. МГТУ. Машиностроение. 1993. № 2. С. 53.
3. Сулимов А.А., Сукоян М.К., Борисов А.А. и др. Взрывчатый состав и заряд из него: Патент № 2215725. РФ // Б.И. 2003. № 31. С. 5.
4. Сулимов А.А., Сукоян М.К., Борисов А.А. и др. Взрывчатый состав и заряд из него: Патент № 2190585. РФ // Б.И. 2002. № 28. С. 23.
5. Andersen E. // Progress in Astron. And Aeron. 1993. V. 155. P. 81.
6. Баум Ф.А., Орленко Л.П., Станюкович К.П. и др. Физика взрыва. М.: Наука, 1975. С. 667.
7. Садовский М.А. // Физика взрыва. М.: Изд-во АН СССР, 1952. № 1. С. 20.
8. Коробейников В.П., Кочина Н.Н., Мельникова Н.С. Теория точечного взрыва. М.: Физматгиз, 1961.
9. Glass I., Patterson G.N. // J. Aeron. Sci. 1953. V. 22. № 2. P. 73.