

ГОРЕНИЕ, ВЗРЫВ  
И УДАРНЫЕ ВОЛНЫ

УДК 532.5

ВЗРЫВНЫЕ ВОЛНЫ В ОТКРЫТОМ ПРОСТРАНСТВЕ  
ПРИ НЕИДЕАЛЬНОЙ ДЕТОНАЦИИ ВЫСОКОПЛОТНЫХ СМЕСЕВЫХ  
СОСТАВОВ, ОБОГАЩЕННЫХ АЛЮМИНИЕМ

© 2009 г. А. А. Борисов, А. А. Сулимов, М. К. Сукоян, П. В. Комиссаров,  
И. О. Шамшин, Р. Х. Ибрагимов, Ю. М. Михайлов\*

*Институт химической физики им. Н.Н. Семенова*

*Российской академии наук, Москва*

*\*Институт проблем химической физики*

*Российской академии наук, Черноголовка*

*E-mail: borisov@chph.ras.ru*

Поступила в редакцию 21.08.2008

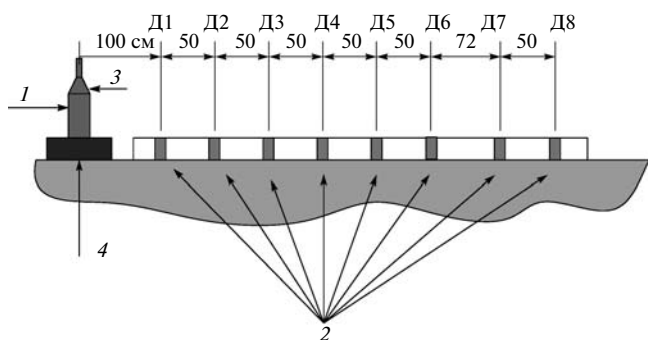
На примере детонации высокоплотных составов перхлорат аммония + алюминий + парафин + гексоген плотностью  $1.8 \text{ г/см}^3$  показана высокая работоспособность исследуемых композиций в открытом воздушном пространстве, в диапазоне амплитуд давления  $0.3 - 7$  атм. Давление и импульс взрывных волн, отнесенные к аналогичным величинам для зарядов тротила равной массы, составили значения  $1.3-2.4$ . Тротильные эквиваленты взрыва по давлению и импульсу изменяются с увеличением расстояния немонокотонно и лежат в диапазоне значений  $1.4-2.8$ . Высокие характеристики взрывной волны были получены в полигонном опыте, который был проведен с зарядом массой  $1.42 \text{ кг}$ . Измерения, проведенные в диапазоне амплитуд взрывной волны от  $1$  до  $20$  атм, дали тротильный эквивалент по давлению, достигающий  $3$ , и тротильный эквивалент по импульсу в диапазоне  $1.3-1.8$ . Высокие параметры взрывных волн в открытом пространстве обусловлены как высокой энергетикой исследованных систем, так и процессом дожигания избытка алюминия кислородом воздуха. Для выяснения степени участия реакции избыточного металлического горючего с кислородом воздуха проведено численное моделирование генерации взрывных волн при различных скоростях смешения продуктов детонации и воздуха на границе раздела. Рассмотрены основные составляющие механизма процессов, контролирующих эффективность взрыва систем с распределенным в пространстве и времени тепловыделением. Сделан вывод о том, что оптимальным режимом генерации взрывных волн, обеспечивающим замедленный спад амплитуды волны с расстоянием, является режим низкоскоростной детонации заряда.

## ВВЕДЕНИЕ

Неидеальная детонация высокоплотных высокоэнергетических составов алюминий–перхлорат аммония–органическое горючее–ВВ позволяет получать взрывные волны более благоприятной конфигурации, чем при использовании нормальной детонации традиционных ВВ, с возможностью регулирования давления и импульса взрывной волны.

В [1] изложены полученные в ИХФ РАН экспериментальные результаты, касающиеся неидеальной детонации подобных составов и генерации взрывных волн в цилиндрическом канале. Приведены данные, включающие исследования детонационной способности составов, а также результаты термодинамических расчетов параметров детонации; показана высокая работоспособность этих составов относительно тротила. Определены параметры взрывных волн, создаваемых в цилиндрической трубе расширяющимися

продуктами детонации высокоплотных зарядов одинакового веса ( $100 \text{ г}$ ) из тротила (ТНТ) и новых составов на основе мелкодисперсных порошков перхлората аммония и алюминия. Для исследованных составов перхлорат аммония (ПХА) – алюминий (АI) – парафин (П) – гексоген (Г) плотностью около  $1.8 \text{ г/см}^3$  получены зависимости относительных давлений на переднем фронте ( $P/P_{\text{TNT}}$ ), импульсов давления ( $I/I_{\text{TNT}}$ ) и тротильных эквивалентов взрыва по давлению и импульсу от расстояния до заряда. Тротильный эквивалент взрыва составил  $1.4-2.8$  по давлению и до  $2$  по импульсу при давлениях в волне  $30-60$  атм. Опыты в трубе позволяют провести измерения в области более высоких амплитуд взрывной волны, но, по-существу, исключают участие воздуха в окислении избыточного горючего в отличие от опытов в открытом пространстве, поскольку в последнем случае возрастающая со временем площадь поверхности раздела между воздухом и



**Рис. 1.** Схема экспериментальной установки по измерению параметров взрывной волны при детонации заряда, размещаемого на полу взрывной камеры: 1 – исследуемый заряд, 2 – тензорезистивные датчики давления, 3 – бустер с капсулом-детонатором, 4 – стальной пенал для защиты и крепления датчиков давления; расстояния даны в см.

продуктами детонации должна увеличить вклад реакции с кислородом воздуха.

Данная статья продолжает исследования работы [1], но эксперименты проведены в практически важной постановке, когда подрыв высокоплотных зарядов из аналогичных составов проводился в открытом пространстве. Установлены высокие параметры взрывных волн, которые обусловлены как высокой энергетикой исследованных систем, так и процессом дожигания избытка алюминия кислородом воздуха.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Взрывные волны, генерируемые при детонации исследуемых составов в открытом воздушном пространстве, исследовались во взрывной камере объемом 250 м<sup>3</sup> и диаметром 8 м. Схема проведения опытов дана на рис. 1 с указанием местоположения датчиков давления и расстояний от датчиков до заряда. Заряд и датчики давления располагались на специальных подставках на расстоянии 10 см от пола камеры.

**Объекты исследования.** Исследовались высокоплотные (плотностью около 1.8 г/см<sup>3</sup>) прессованные заряды из высокоэнергетических смесевых составов на основе перхлората аммония и алюминия, детонирующие в неидеальных режимах, при которых до плоскости Чепмена–Жуге выделяется только относительно незначительная часть энергии, запасенной в исходном материале. Использовали мелкодисперсные порошки алюминия, ПХА и гексогена заводского производства. В качестве органического инертного горючего-газ-провайдера в основной серии опытов использовали парафин. Кроме парафина, исследовались также порошкообразные полимеры типа полиметилметакрилата, тефлон и графит.

Гексоген выполнял роль сенсibilизатора и обеспечивал устойчивое распространение детонации. Дисперсность ПХА составляла 20 мкм, гексогена – 50–70 мкм. Во всех опытах данной серии использовали чешуйчатый алюминий марки ПАП-2 с частицами толщиной 1.2 мкм и удельной поверхностью около 7000 см<sup>2</sup>/г. Смесью алюминия, ПХА и гексогена тщательно перемешивали, после чего вводили парафин растворенный в бензине.

Композиции для исследования были выбраны с учетом результатов термодинамических расчетов. Композиции обогащены алюминием и включали 21–26% алюминия, 3–6% парафина и 20% гексогена, остальное приходилось на ПХА [2–4]. Все исследованные составы были переобогащены горючим компонентом и имели существенно отрицательный кислородный баланс.

**Условия эксперимента.** Применялись заряды одинакового веса, изготавливаемые прессованием в виде шашек диаметром 50 мм и высотой 70–75 мм без оболочки. Заряд инициировали промежуточным детонатором – бустером, состоящим из 40 г прессованного TNT, который генерировал плоскую ударную волну. Вес основного заряда составлял 250 г, суммарный вес заряда с тротильным бустером был равен 290 г. Исследовалось влияние состава смеси при неизменном содержании гексогена (20%). Эксперименты проводились при температуре 20°C.

Для регистрации давления, кроме пьезокварцевых датчиков, использовались тензорезистивные помехоустойчивые датчики давления торцевого типа, которые помещались в специальные стальные пеналы. Количество датчиков составляло 4–6. Принимались специальные меры по защите датчиков. Сигналы с датчиков давления через аналого-цифровой преобразователь регистрировались на компьютере. Получаемые осциллограммы в координатах давление–время  $p(t)$  представлялись как в исходном виде, так и в виде кривых, сглаженных по 10 точкам. Из этих осциллограмм определяли давление на переднем фронте ударной волны (давление на фронте корректировали, используя известное соотношение между скоростью и давлением воздушной ударной волны [5]) и импульс давления (интегрируя зависимость  $p(t)$ ). Регистрация осциллограмм давление–время при взрыве сильно алюминизированных смесевых составов представляет значительные методические трудности, связанные с высоким уровнем электромагнитных наводок, которые были преодолены. В результате получены записи удовлетворительного качества.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Рассмотрим в качестве примера результаты, полученные в трех опытах (один опыт с эталон-

**Характеристики изученных составов и результаты измерений параметров взрывных волн  
в открытом пространстве**

Номер состава	Состав	K, %	Плотность зарядов, г/см <sup>3</sup>	Параметры взрывной волны						
				R, см	P, атм	I, атм · мс	P/P <sub>TNT</sub>	I/I <sub>TNT</sub>	E <sub>TNT</sub> <sup>P</sup>	E <sub>TNT</sub> <sup>I</sup>
В1	TNT	-74	1.5 (0.92)	150	2.51	—	—	—	—	—
				248	0.72	0.39	—	—	—	—
				348	0.39	0.315	—	—	—	—
				420	0.26	0.28	—	—	—	—
				470	0.23	0.265	—	—	—	—
В2	26% Al + 48% ПХА + + 6% П + 20% Г	-32	1.8 (0.93)	248	1.1	0.64	1.53	1.64	1.38	2.17
				348	0.61	0.46	1.56	1.46	2.1	2.14
				420	0.41	0.37	1.58	1.32	2.05	1.81
				470	0.36	0.35	1.57	1.32	2.39	1.86
В3	21% Al + 56% ПХА + + 3% П + 20% Г	-2	1.8 (0.89)	100	7.1	1.19	1.2	—	—	—
				150	3.54	0.96	1.42	—	—	2.21
				248	1.05	0.62	1.45	1.59	1.34	2.03
				348	0.49	0.43	1.26	1.37	1.36	1.84
				420	0.36	0.35	1.38	1.25	1.63	1.57
				470	0.34	0.34	1.48	1.28	2.15	1.75

Примечание: K — кислородный баланс.

ным зарядом тротила и два опыта с исследуемыми смесями разного состава). Характеристики зарядов (состав, кислородный баланс и плотность заряда) приведены в таблице 1.

В опыте с составом В1 применялся заряд из TNT плотностью 1.5 г/см<sup>3</sup>, изготовленный прессованием из частиц размером менее 100 мкм. В опыте с В2 применялся состав 26% Al + 48% ПХА + 6% П + 20% Г с повышенным содержанием алюминия и парафина. Такой же состав был использован ранее [1] в опыте с А2, проведенном в цилиндрической трубе (см. таблицу 1 в [1]). Опыт с В3 проведен с составом 21% Al + 56% ПХА + 3% Гр + 20% Г, в котором парафин был заменен мелкодисперсным графитом (Гр) с размером частиц порядка 5 мкм, а содержание горючих компонентов уменьшено. Полученные результаты представлены в таблице 1 и на рис. 2–7.

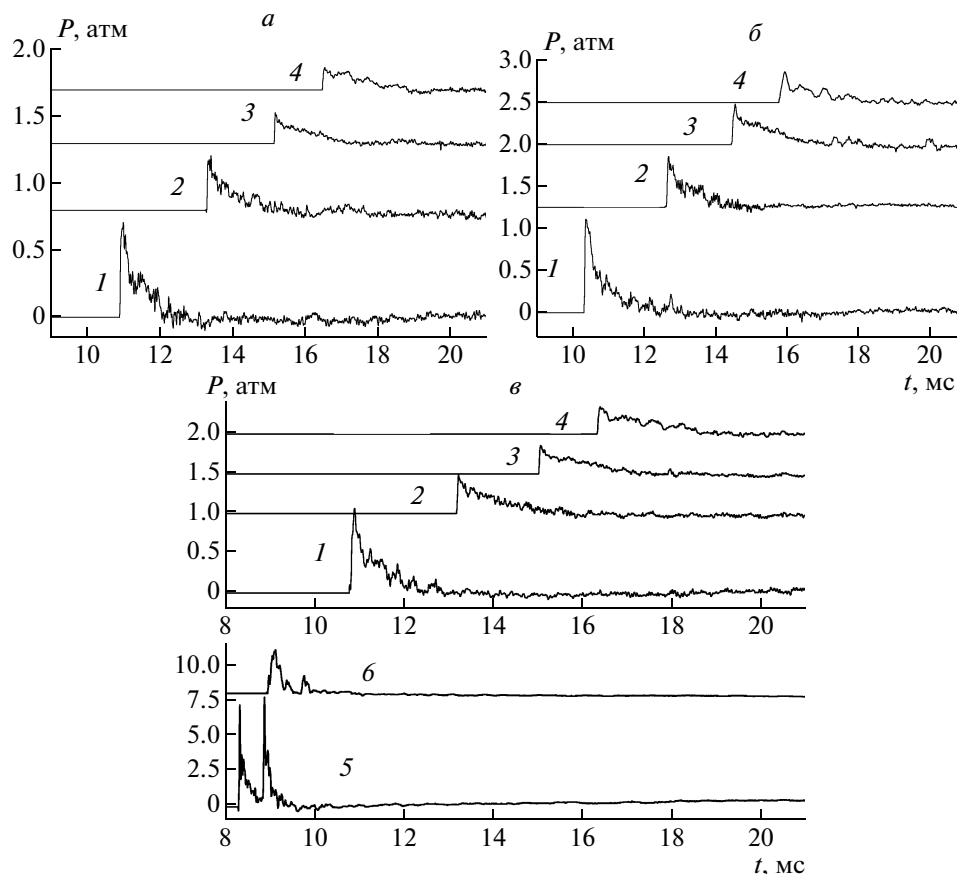
На рис. 2 представлены сглаженные по 10 точкам осциллограммы давление–время, полученные в опытах с В1, В2 и В3 на различных расстояниях от заряда. В опытах с В1 и В2 было использовано четыре датчика, которые располагались на расстояниях 248, 348, 420 и 470 см от заряда. В опыте В3 применяли шесть датчиков, которые располагались на расстояниях 100, 150, 248, 348, 420 и 470 см от заряда. Как видно из рис. 2в, в опыте В3 на базах 100 и 150 см наряду с основной проходящей волной наблюдается волна, отраженная от стенки камеры, около которой распо-

лагался заряд. Эта волна распространяется с меньшей скоростью, чем основная проходящая волна, и с течением времени вырождается: на расстоянии 248 см и далее, вследствие интенсивного рассеяния в облаке расширяющихся продуктов детонации, следы этой волны на осциллограммах отсутствуют.

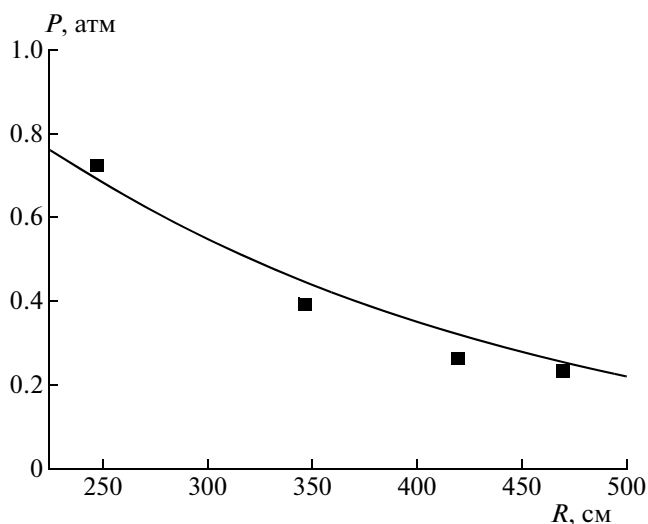
Рассмотрим результаты исследования.

1. Экспериментальные данные по избыточному давлению взрывной волны, генерируемой зарядом TNT, были сопоставлены с результатами расчета, проведенного по общепринятой формуле Садовского [6], для наземного взрыва заряда TNT массой 290 г на поверхности земли. Соответствующие экспериментальные и расчетные данные приведены на рис. 3. Получено удовлетворительное согласие эксперимента с расчетом: расхождение между экспериментом и расчетом не превышало 12% (при погрешности измерения давления около ±10%).

2. Зависимости избыточного давления и импульса давления взрывной волны от расстояния для исследованных составов (опыты В2 и В3), полученные в диапазоне расстояний от 248 до 470 см, приведены на рис. 4. Там же для сравнения приведены аналогичные данные, полученные для заряда TNT того же веса. Видно, что во всем диапазоне взрывные волны, генерируемые исследуемыми составами, имеют более высокие параметры, чем взрывные волны от TNT. Видно также, что



**Рис. 2.** Экспериментальные (сглаженные) профили давление–время взрывных волн, образующихся при детонации зарядов массой 290 г: *a* – опыт с TNT плотностью  $1.5 \text{ г/см}^3$ , обозначения: 1 – Д1,  $L = 248 \text{ см}$ ; 2 – Д2,  $L = 348 \text{ см}$ ; 3 – Д1,  $L = 420 \text{ см}$ ; 4 – Д4,  $L = 470 \text{ см}$ ; *б* – опыт с составом В2 плотностью  $1.8 \text{ г/см}^3$ , обозначения: 1 – Д1,  $L = 248 \text{ см}$ ; 2 – Д2,  $L = 348 \text{ см}$ ; 3 – Д3,  $L = 420 \text{ см}$ ; 4 – Д4,  $L = 470 \text{ см}$ ; *в* – опыт с составом В3 плотностью  $1.8 \text{ г/см}^3$ , обозначения: 1 – Д1,  $L = 248 \text{ см}$ ; 2 – Д2,  $L = 348 \text{ см}$ ; 3 – Д3,  $L = 420 \text{ см}$ ; 4 – Д4,  $L = 470 \text{ см}$ ; 5 – Д5,  $L = 100 \text{ см}$ ; 6 – Д6,  $L = 150 \text{ см}$ .



**Рис. 3.** Зависимость избыточного давления на фронте волны от расстояния для заряда тротила массой 290 г и плотностью  $1.5 \text{ г/см}^3$  (точки – эксперимент, линия – расчет по эмпирической формуле Садовского).

состав В2, содержащий, в сравнении с составом В3, большее количество алюминия и парафина, обеспечивает более высокие значения давления и импульса.

3. На рис. 5 представлены значения относительного давления и относительного импульса в зависимости от расстояния для состава 26% Al + 48% ПХА + 6% П + 20% Г (опыт с составом В2). Здесь же показаны значения тротильных эквивалентов взрыва по давлению и импульсу. Те же данные, но в зависимости от давления во фронте волны приведены на рис. 6. Видно, что в диапазонах расстояний 248–470 см и давлений во фронте волны 0.3–1.1 атм относительные значения давления и импульса лежат в диапазоне 1.3–1.6, а тротильные эквиваленты составляют от 1.4 до 2.4.

4. Аналогичные данные для состава 21% Al + 56% ПХА + 3% Gr + 20% Г (опыт В3), содержащего меньше горючих компонентов, приведены на рис. 7. Здесь соответствующие показатели оказались несколько ниже, чем в опыте с В2.

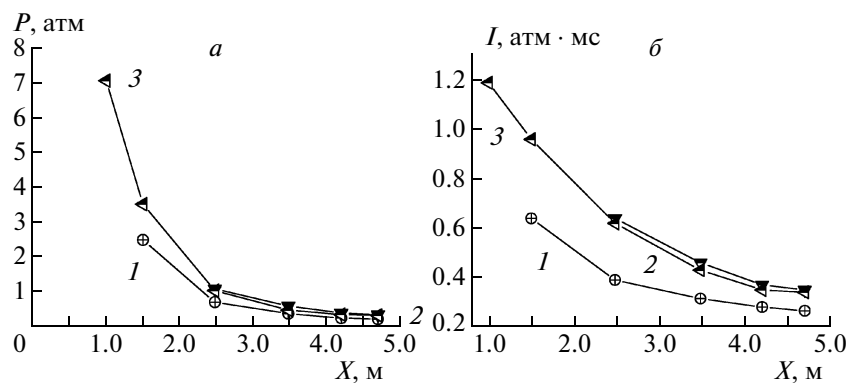


Рис. 4. Избыточное давление (а) и импульс давления (б) взрывной волны в зависимости от расстояния для тротила и смесей составов В2 и В3: 1 – TNT; 2 – состав В2; 3 – состав В3.

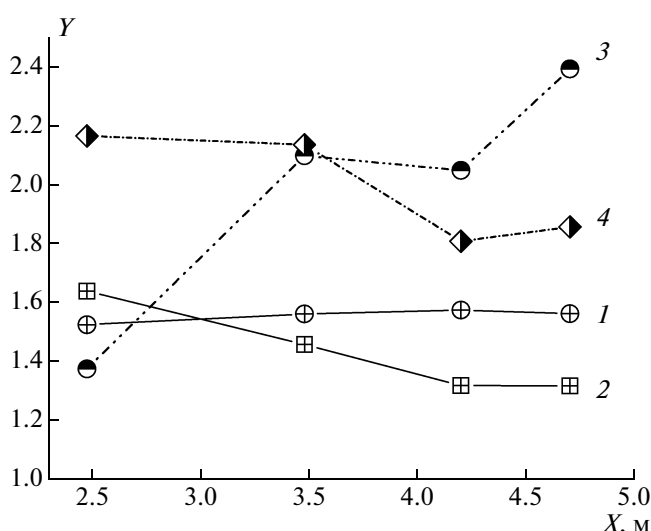


Рис. 5. Относительное давление на фронте и относительный импульс давления взрывной волны, а также тротиловые эквиваленты взрыва по давлению и импульсу в зависимости от расстояния для состава В2: 1 –  $P/P_{TNT}$ , 2 –  $I/I_{TNT}$ , 3 –  $E_{TNT}^P$ , 4 –  $E_{TNT}^I$ .

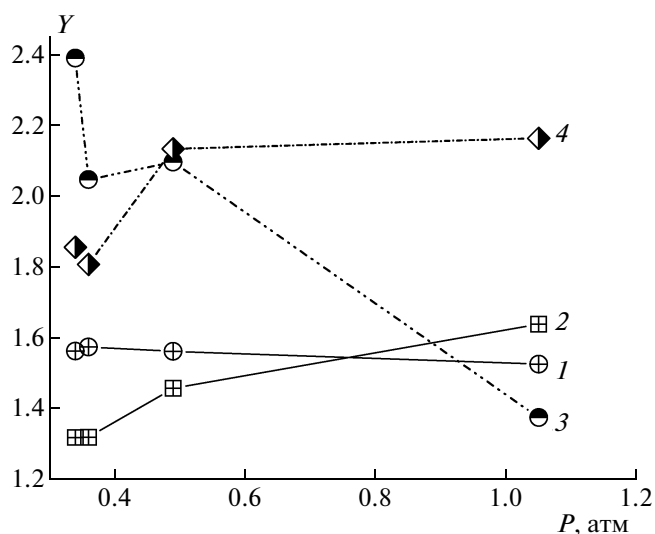


Рис. 6. Относительное давление на фронте и относительный импульс давления взрывной волны, а также тротиловые эквиваленты взрыва по давлению и импульсу в зависимости от давления на фронте волны для состава В2: 1 –  $P/P_{TNT}$ , 2 –  $I/I_{TNT}$ , 3 –  $E_{TNT}^P$ , 4 –  $E_{TNT}^I$ .

5. Опыты с составами В2 и А3, позволяют хотя бы качественно сопоставить характеристики взрывных волн при взрыве в трубе и в открытом пространстве. Хотя условия сильно различаются (амплитуды давления при взрыве в открытом пространстве существенно ниже, чем при взрыве в трубе, из-за более быстрого затухания сферической волны), характеристики относительно тротила оказались одинаково высокими, и лишь тротильный эквивалент по импульсу оказался более высоким при взрыве в открытом пространстве.

**Полигонный опыт с зарядом увеличенного веса.** Изложенные выше результаты соответствовали высокоплотным составам с плотностью около  $1.8 \text{ г/см}^3$ . При этом вес заряда не превышал 290 г. Дополнительно был проведен полигонный на-

земный взрыв в слабой полимерной оболочке заряда увеличенного веса (1.42 кг) насыпной плотности ( $1.0 \text{ г/см}^3$ ). Состав 26% А1 + 52% ПХА + 12% НМ + 10% Г отличался от изученных составов тем, что содержание гексогена было уменьшено с 20 до 10%, а парафин был заменен на 12% нитрометана (НМ). Подрыв осуществляли бустером из 300 г аммонита (по энергии аммонит близок к тротилу). Датчики давления были тарированы взрывом заряда тротила весом 427 г. Полученные результаты представлены на рис. 8–11. Установлено, что тротильные эквиваленты по давлению и импульсу для взрыва исследуемой смеси изменяются немонотонно с увеличением расстояния от заряда. Среднее значение тротилового эквивалента по давлению близко к 3 в диапазоне избыточных

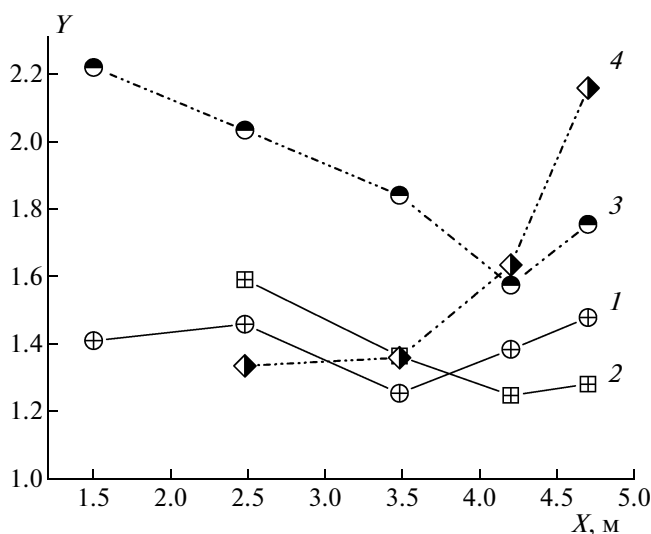


Рис. 7. Относительное давление на фронте и относительный импульс взрывной волны, а также тротиловые эквиваленты взрыва по давлению и импульсу в зависимости от расстояния для состава В3: 1 –  $P/P_{TNT}$ , 2 –  $I/I_{TNT}$ , 3 –  $E^p_{TNT}$ , 4 –  $E^I_{TNT}$ .



Рис. 8. Видеокадр полигонного взрыва заряда смеси 26% Al + 52% ПХА + 12% НМ + 10% Г массой 1.42 кг.

давлений от 20 до 1 атм. Средние значения тротилового эквивалента по импульсу составляют 1.4–1.8. Анализ результатов видеосъемки показал, что максимальный объем светящегося облака при взрыве исследуемой смеси приблизительно в 8 раз превышал максимальный объем светящегося облака при взрыве зарядов тротила одинакового веса. Это означает, что при одинаковых весах зарядов объем облака продуктов детонации смесового состава приблизительно в 2 раза больше, чем объем продуктов тротилового взрыва.

### РАСЧЕТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗРЫВНЫХ ВОЛН, ГЕНЕРИРУЕМЫХ НЕИДЕАЛЬНОЙ ДЕТОНАЦИЕЙ СОСТАВОВ, СОДЕРЖАЩИХ БОЛЬШОЙ ИЗБЫТОК ГОРЮЧЕГО (АЛЮМИНИЯ)

Включение кислорода воздуха в реакцию окисления избыточного металлического горючего в энергетическом материале – один из самых эффективных подходов к увеличению параметров ударных волн, генерируемых взрывом. Данный подход требует решения двух основных проблем: 1) обеспечения необходимой скорости смешения продуктов взрыва, богатых горючим, с воздухом и 2) обеспечения необходимой скорости реагирования, при которой сохраняется связь между выделением тепла и ударной волной (т.е. выделяющаяся энергия горения топлива в воздухе успевает поддерживать и усиливать взрывную волну).

Была предпринята попытка провести оценку скорости реагирования продуктов взрыва с воздухом, обеспечивающей усиление взрывной волны, с тем, чтобы ответить на вопрос о требуемой скорости смешения и реагирования частиц конденсированного горючего, разлетающегося с продуктами взрыва энергетического материала.

На первом этапе с помощью компьютерного моделирования решались две задачи: 1) трехмерный разлет продуктов взрыва без реакции с целью определения скорости роста и размера волн неустойчивости на границе расширяющегося облака и 2) одномерный разлет продуктов взрыва смеси нитрат аммония/алюминий в соотношении 50/50 при различных скоростях турбулентного смешения продуктов взрыва с воздухом и реакции топлива и окислителя с целью определения возможного эффекта дополнительного тепловыделения.

**Задача 1.** Рассмотрено расширение облака продуктов взрыва TNT в воздухе с размером расчетной сетки, позволяющей разрешить волны неустойчивости на границе облака. Первоначально облако имеет сферическую форму. Если предположить, что смешение продуктов и воздуха происходит со скоростью роста возмущений на поверхности (с усреднением концентраций по слою, охваченному возмущениями в каждый момент времени), то из результатов моделирования следует, что развитие неустойчивости эквивалентно (на начальной стадии расширения продуктов) увеличению коэффициента диффузии на границе облака не более чем в  $10^6$  раз по сравнению с его величиной в воздухе при нормальных условиях.

**Задача 2.** В одномерном варианте моделировалось расширение продуктов взрыва смеси нитрат аммония/алюминий в соотношении 50/50. В расчетах учитывались реакции разложения частиц

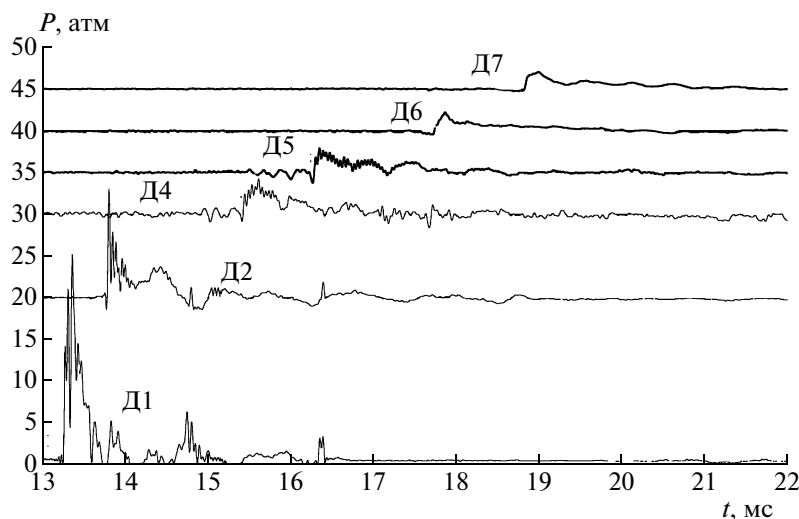


Рис. 9. Регистрограммы давления воздушной ударной волны, полученной при взрыве заряда смеси 26% Al + 52% ПХА + 12% НМ + 10% Г массой 1.42 кг.

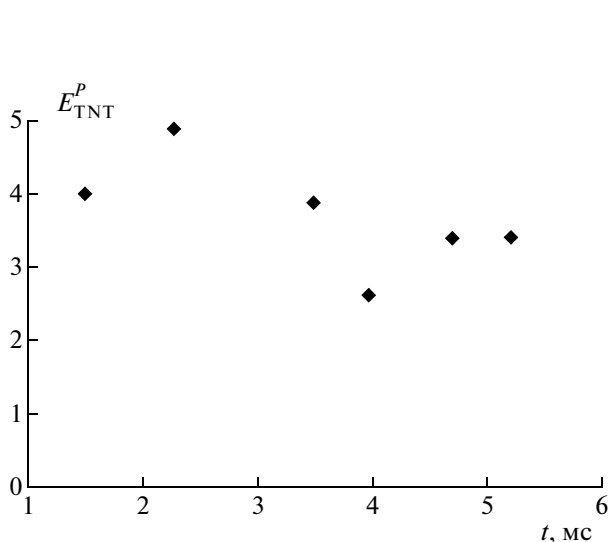


Рис. 10. Тротильный эквивалент взрыва по давлению для заряда смеси 26% Al + 52% ПХА + 12% НМ + 10% Г массой 1.42 кг.

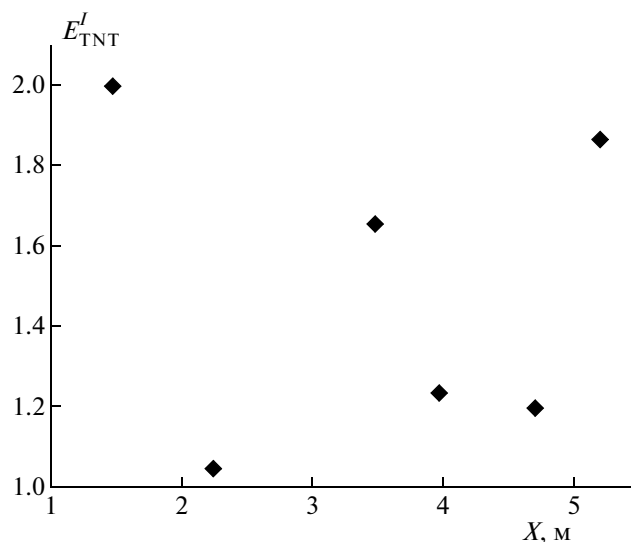
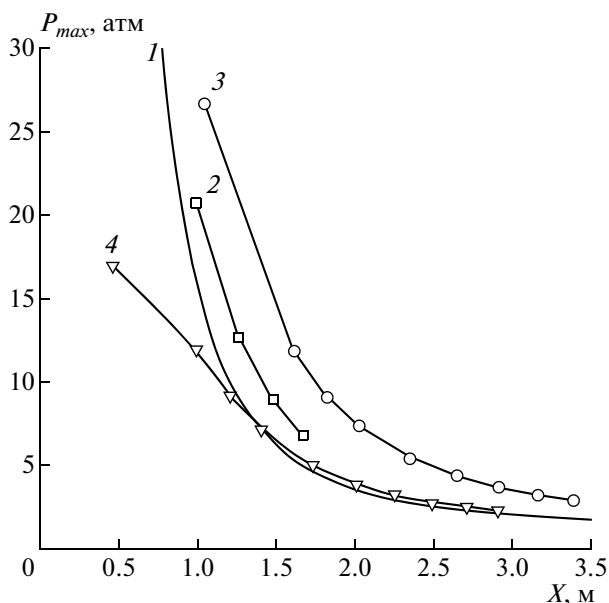


Рис. 11. Тротильный эквивалент взрыва по импульсу для заряда смеси 26% Al + 52% ПХА + 12% НМ + 10% Г насыпной плотности массой 1.42 кг.

нитрата аммония, горения частиц алюминия и горения водорода, образующегося при взрыве богатой алюминием смеси, с воздухом. Для упрощения расчета на начальной стадии в ходе расширения облака продуктов взрыва искусственно вводили в него воздух с заданной скоростью (что далее названо турбулентным подмешиванием). Были рассмотрены два варианта для скорости реагирования: в случае быстрой реакции (частицы размером 1 мкм) характерное время реагирования равнялось 1 мс; в случае медленного горения время реагирования было увеличено более чем на порядок. Увеличивая время реагирования, мы пытались смоделировать неизбежную задержку сме-

шения с воздухом, связанную с тем, что на начальном этапе разлетаются не индивидуальные частицы, а их агрегаты. Рисунок 12 демонстрирует расчетные зависимости давления во взрывной волне в воздухе от расстояния при взрыве заряда массой 800 г на поверхности земли для следующих случаев: без турбулентного подмешивания, но с быстрой реакцией частиц; при наличии турбулентного подмешивания воздуха и быстрой реакции частиц; без турбулентности и с медленной реакцией. Кривая 1 – расчет по формуле Садовского для взрыва заряда TNT такого же веса. Согласно проведенным оценкам тротильный эквивалент по давлению в самом благоприятном слу-



**Рис. 12.** Рассчитанное давление на фронте взрывной волны для взрыва заряда весом 800 г в зависимости от расстояния: 1 – TNT, расчет по формуле Садовского, 2 – смесь нитрат аммония/алюминий 50 : 50, размер частиц обоих компонентов – 1 мкм (быстрое горение, время горения 0.5 мс), турбулентное смешение не учитывается; 3 – условия те же, что и в расчете 2 за исключением того, что турбулентное смешение включено; 4 – частицы алюминия диаметром 3 мкм, частицы ПХА диаметром 10 мкм (медленное горение).

чае не превышает 3.5. Следует отметить, что упрощенные расчеты дают завышенное значение тротилового коэффициента, поскольку воздух подмешивался как бы извне (не за счет его поступления через фронт волны).

Идеально детонирующие заряды создают сферическую ударную волну, течение за которой ламинарно, а гидродинамическая неустойчивость поверхности раздела не способна обеспечить турбулентный перенос, требуемый для поддержания и усиления взрывной волны. Для оценки возможного эффекта интенсивного смешения на начальной стадии расширения продуктов были проведены расчеты в следующей постановке. Коэффициент конвективной диффузии  $D$  ( $\text{м}^2/\text{с}$ ) умножался в расчетах на функцию  $1/2[1 + \text{th}\{(r_0 - r)/dr\}]$ , где  $r_0$  – расстояние, на котором действует турбулентная диффузия, а  $dr$  – ширина переходной зоны между интенсивной массопередачей и практически нулевой массопередачей (значения этих параметров варьировались в расчетах). Анализировался взрыв смеси алюминий/нитрат аммония состава 50/50 с размером частиц 1 мкм плотностью 173.9  $\text{кг}/\text{м}^3$  (низкая плотность) и 1739  $\text{кг}/\text{м}^3$  (высокая плотность).

Проведенные расчеты более корректно отражают процессы, которые происходят при расши-

рении облака продуктов, богатых горючим, с учетом гидродинамической неустойчивости поверхности раздела на начальном участке. Однако даже при значениях эффективного коэффициента диффузии, близких к тем, которые можно ожидать из оценок развития гидродинамической неустойчивости поверхности раздела (которые, в свою очередь, завышены, поскольку, во-первых, само увеличение поверхности раздела еще не означает соответствующего увеличения скорости смешения на молекулярном уровне, необходимого для изменения скорости окисления, и, во-вторых, диффузия “сглаживает” неровности поверхности раздела) усиление интенсивности ударной волны за счет реакции продуктов детонации с воздухом остается пренебрежимо малым. Показано, что при большой скорости конвективного перемешивания тротильный эквивалент взрыва рассматриваемой смеси начинает превышать единицу только при давлениях в волне менее 5 атм, и его максимальное значение (около 2.5) достигается при относительном давлении на фронте 0.4 атм. В смесях с более калорийным окислителем (перхлорат аммония) значения тротилового эквивалента будут выше в соответствии с энергетикой реакций.

Если говорить о среднем тротильном эквиваленте, то он не должен превышать отношение полной энергии взрыва смеси + возможное тепловыделение за счет реакции избыточного горючего с воздухом к энергии взрыва эквивалентной массы TNT даже при низких значениях избыточного давления на фронте волны. Реальные значения будут меньше из-за недогорания частиц и образования меньшего количества газовой фазы.

Из результатов расчетов следует, что естественное смешение продуктов детонации с воздухом за счет развития гидродинамической неустойчивости контактной поверхности недостаточно для эффективного поддержания и усиления взрывной волны посредством выделения энергии при окислении избыточного горючего продуктов детонации кислородом воздуха. Для неидеальной детонации смесевых составов тротильный эквивалент взрыва зависит от расстояния и изменяется немонотонно, что согласуется с экспериментом.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На примере составов перхлорат аммония + алюминий + парафин + гексоген плотностью 1.8  $\text{г}/\text{см}^3$  показана высокая работоспособность исследуемых композиций в открытом воздушном пространстве, в диапазоне амплитуд взрывной волны 0.3–7 атм. Значения давления и импульса взрывных волн, отнесенные к аналогичным величинам для зарядов тротила равной массы, составили 1.3–2.4. Тротильные эквиваленты взрыва по давлению и импульсу изменяются с расстоянием



немонотонно и лежат в диапазоне значений 1.4–2.8. Высокие характеристики взрывной волны были получены в полигонном опыте, который был проведен с зарядом массой 1.42 кг. Измерения, проведенные в диапазоне амплитуд взрывной волны от 1 до 20 атм, дали тротилловый эквивалент по давлению, достигающий 3, и тротилловый эквивалент по импульсу в диапазоне 1.3–1.8. Высокие параметры взрывных волн в открытом пространстве обусловлены как высокой энергетикой исследованных систем, так и процессом дожигания избытка алюминия кислородом воздуха.

Для анализа и объяснения механизмов выделения энергии на различных стадиях взрывного процесса использовано численное моделирование. По результатам моделирования можно сделать следующие выводы. Естественное смешение продуктов детонации с воздухом за счет развития гидродинамической неустойчивости контактной поверхности недостаточно для эффективного поддержания и усиления взрывной волны посредством выделения энергии при окислении избыточного металлического горючего продуктов детонации кислородом воздуха. Для неидеальной детонации смесевых составов тротилловый эквивалент взрыва зависит от расстояния и изменяется немонотонно, что согласуется с экспериментом.

Эксперимент и расчеты демонстрируют неравномерное распределение повышенных значений тротилового эквивалента в пространстве. Проведение взрывного процесса в заряде в режиме неидеальной детонации естественно приводит к резкому снижению тротилового эквивалента в области высоких амплитуд волны. Порог, с которого неидеальные режимы взрыва становятся более эффективными, чем детонационные взрывы идеальных ВВ, зависят от многих факторов, выяснение роли которых требует более подробных исследований.

Для зарядов с избытком металла, при взрывах которых вклад от реакции с воздухом ожидается существенным, максимальные тротилловые эквиваленты значительно превышают единицу (до 4 по давлению и до 2 по импульсу волны) только в области амплитуд волны, не превышающих 50 атм, и только при наличии в заряде газпровайдера. Предварительные двумерные расчеты показывают, что неидеально детонирующие заряды позволяют регулировать поле давления (равномерность действия волны в пространстве) в более широких пределах, чем при идеальных режимах.

Основные составляющие механизма процессов, контролирующих эффективность взрыва систем с распределенным в пространстве и времени тепловыделением, можно сформулировать следующим образом.

1. Взрывной процесс в заряде должен обеспечить высокую температуру газообразных продуктов реакции, достаточную для зажигания частиц

металла и окислителя, когда они начинают расширяться при разрыве оболочки, т.е. реагирование энергетического материала в заряде должно быть достаточно глубоким.

2. Ударная волна на начальной стадии также должна дополнительно нагреть частицы, чтобы поддержать быстрое разложение окислителя и зажигание металла, т.е. давление в заряде перед началом интенсивного расширения продуктов должно быть высоким.

3. Частицы с самого начала расширения гетерогенной смеси должны быть мелкими, т.е. близкими по размеру к начальным частицам компонентов заряда, чтобы их горение и разложение могло эффективно подпитывать ударную волну, а следовательно, физическая связь между индивидуальными частицами должна быть достаточно слабой. Желательный сильно неоднородный поток продуктов при расширении достигается в результате неоднородного распределения компонентов смеси по заряду.

4. Разлет гетерогенной смеси на начальной стадии должен обеспечить максимально неоднородную (максимальную по площади) поверхность контакта ее с воздухом, чтобы скорость окисления металла кислородом воздуха была достаточной для поддержания взрывной волны, быстро удаляющейся от контактной поверхности. Обтекание крупных осколков гетерогенным потоком приведет не только к интенсификации смешения его с воздухом, но также будет способствовать более быстрому дроблению конгломератов частиц, неизбежно возникающих в начале истечения. Неоднородное распределение быстро реагирующих компонентов в смеси будет способствовать не только лучшему дроблению конгломератов частиц, но также созданию долгоживущих горячих очагов в расширяющихся продуктах, которые будут поддерживать реакцию в их смеси с воздухом, образующейся в ходе расширения.

Вышеприведенные составляющие процесса генерации взрывных волн указывают на то, что существенного превышения эффективности гетерогенных энергетических материалов над штатными гомогенными ВВ можно ожидать только в определенных диапазонах амплитуды взрывной волны. При очень высоких амплитудах волны, которые для ряда практических применений оказываются чрезмерно высокими и приводят только к непроизводительным потерям энергии, тротилловый эквивалент смесей всегда существенно меньше единицы (тем меньше, чем больше горючего в заряде и меньше гомогенного ВВ). В целом (по всему полю давления) тротилловый эквивалент гетерогенной смеси практически всегда меньше отношения удельных идеальных энергий взрыва исходной смеси (с учетом возможной реакции горючего с кислородом воздуха) и тротила,

поскольку неизбежны потери, связанные с недогоранием частиц.

Оптимизация взрывного эффекта гетерогенных смесей, детонирующих в неидеальных режимах, требует проведения большого цикла расчетных исследований, поскольку экспериментальная отработка зарядов — чрезвычайно трудоемкий и дорогостоящий процесс.

Авторы выражают благодарность Б.С. Ермолаеву и С.И. Сумскому за помощь при выполнении и обсуждении результатов работы.

Исследования выполнялись при финансовой поддержке Российским фондом фундаментальных исследований (проекты № 06-03-32097, № 06-03-08167-офи и № 09-03-00229а) и Программой № 5 Отделения химии и наук о материалах РАН.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сулимов А.А., Борисов А.А., Ермолаев Б.С. и др. // Хим. физика. 2009. Т. 28. № 9.
2. Сулимов А.А., Сукоян М.К., Борисов А.А. и др. // Матер. 3-й Всерос. конф. “Энергетические конденсированные системы”. Черногловка: ИПХФ РАН, 2006. С. 118.
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 для скважин: Патент № 2190585 РФ // Б.И. 2002. № 28. С. 23.
5. Баум Ф.А., Орленко Л.П., Станюкович К.П. и др. Физика взрыва. М.: Наука, 1975. С. 667.
6. Садовский М.А. // Физика взрыва. М.: Изд-во АН СССР, 1952. № 1. С. 20.