

ГОРЕНИЕ, ВЗРЫВ
И УДАРНЫЕ ВОЛНЫ

УДК 535.71

ВЗРЫВНЫЕ ВОЛНЫ В ЦИЛИНДРИЧЕСКОМ КАНАЛЕ
ПРИ НЕИДЕАЛЬНОЙ ДЕТОНАЦИИ СМЕСЕВЫХ ВЫСОКОПЛОТНЫХ
СОСТАВОВ АЛЮМИНИЙ–ТЕФЛОН–ГЕКСОГЕН

© 2012 г. А. А. Сулимов*, Б. С. Ермолаев, М. К. Сукоян

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

**E-mail: aasul@center.chph.ras.ru*

Поступила в редакцию 13.10.2011

Измерены давление на фронте и импульс давления взрывных волн, генерируемых в цилиндрической трубе при расширении продуктов неидеальной детонации зарядов низкой пористости, получаемых путем прессования из мелкодисперсных порошков алюминия, тефлона и гексогена. Измеренные параметры отнесены к аналогичным параметрам взрывных волн, получаемых при детонации заряда тротила одинаковой массы. Относительные величины использованы для оценки эффективности взрывных волн по отношению к тротилу. Изучались смесевые составы, различающиеся формой частиц (маркой) порошка алюминия и соотношением компонентов при содержании гексогена 30%. Показано, что для исследованных смесей давление на переднем фронте волны превышает давление при взрыве тротила в среднем на 10–30% почти независимо от расстояния, пройденного вдоль трубы, в интервале от 0.8 до 3.8 м. Зависимость амплитуды волны от формы частиц и содержания алюминия оказалась слабой. В этом же интервале расстояний относительный импульс давления сильно растет от ~0.5 до 2.1 и выше, главным образом за счет увеличения длины волны. Этот результат представляет интерес для получения высоких импульсов давления взрывных волн в зоне, удаленной от заряда. Полученные данные позволяют сделать предположение о том, что в детонационной волне реагирует в основном гексоген, химическое превращение тефлона и алюминия в детонационной волне и в ближней к заряду зоне, если и происходит, то со значительной неполнотой. Напротив, по мере продвижения фронта волны по каналу догорание алюминия в среде фтора, который образуется при разложении тефлона, оказывает ощутимую поддержку взрывной волне, создавая значительный прирост импульса давления.

Ключевые слова: неидеальная детонация, взрывная волна, алюминий, тефлон, гексоген, тротил.

ВВЕДЕНИЕ

При детонации зарядов обычных конденсированных ВВ в воздухе распределение энергии не является оптимальным с точки зрения достижения высокого фугасного действия. 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 поражения большинства окружающих объектов. Неидеально детонирующие смесевые ВВ открывают возможность снижать до разумных пределов давление детонации, растягивать во времени тепловыделение, оставляя его все же достаточно быстрым, для того чтобы задержанное тепловыделение успевало поддерживать взрывную волну.

Ранее [1, 2] в ходе исследований, проведенных в каналах и в открытом воздушном пространстве, было показано, что взрывные волны, образующиеся при неидеальной детонации смесевых компо-

зиций на основе перхлората аммония, углеводородного горючего, алюминия и гексогена, обладают повышенными характеристиками. Главной особенностью наблюдаемого режима химического превращения является то, что во фронте детонационной волны выделяется только часть химической энергии, преимущественно вследствие разложения взрывчатого сенсibilизатора – гексогена, а основная часть энергии выделяется в ходе реакций, растянутых в пространстве и времени.

В настоящей работе измерены параметры взрывных волн, образующихся в цилиндрическом канале при расширении продуктов неидеальной детонации трехкомпонентных композиций из мелкодисперсных порошков тефлона, алюминия и гексогена. Данные составы, обогащенные алюминием, обладают высокой теоретической плотностью, достигающей 2.2 г/см³. Особый научный интерес вызывает взаимодействие алюминия с фтором, который образуется при разложении тефлона.

Воздушные взрывные волны генерировали в канале установки “цилиндрическая труба”, которая описана в [1]. Условия опытов позволяют свети к минимуму возможное участие кислорода воздуха в реакциях с горючими компонентами 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 той зоне взрыва, где реализуются давления порядка нескольких десятков атмосфер.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследовались две взрывчатые композиции: состав с избытком алюминия, в котором алюминий (Al), тефлон (Т) и гексоген (Г) были взяты в процентном соотношении 31.5%Al + 38.5%Т + 30%Г, а также состав с соотношением компонентов, равным 18%Al + 52%Т + 30%Г, в котором отношение алюминий/тефлон отвечает стехиометрии (26%Al/74%Т). Гексоген в виде порошка со средним размером частиц 50–70 мкм использовался в качестве взрывчатого сенсibilизатора. Его содержание в смесях составило 30%, что согласно имеющемуся опыту позволяет избежать трудностей с инициированием независимо от свойств остальных компонентов. Применялся алюминиевый порошок двух марок: марки ПАП-2 с частицами в форме чешуек толщиной 1.2 мкм и удельной поверхностью около 7000 см²/г и марки АСД-6 с частичками сферической формы, имеющий близкую удельную поверхность 6500 см²/г при среднемассовом размере частиц 3.7 мкм. Тефлон (фторопласт марки 4-Ф-4ПН) был использован в виде порошка с размером частиц менее 100 мкм в том состоянии, как он был поставлен (т.е. без дополнительного отсева). Смесь тщательно перемешивали и прессовали в шашки диаметром 23 мм и высотой, примерно равной диаметру, с пористостью ~10%. Из шашек собирали заряд длиной ~120 мм (т.е. длиной не менее пяти диаметров заряда) и весом 92 г. Для инициирования в качестве бустера использовали таблетку тротила весом 8 г с отверстием под капсуль-детонатор ЭД-8. Таблетки изготавливали прессованием до плотности 1.5 г/см³. Заряд вместе с бустером (общий вес сборки равен 100 г) обматывали липкой полимерной лентой и размещали в канале зарядной камеры, центрируя сборку с помощью специальных вставок таким образом, чтобы бустер был обращен к закрытому торцу камеры, а открытые торцы заряда и зарядной камеры совпадали. Зарядная камера изготавливалась из прочной термообработанной стали марки 30ХГСА и имела внутренний диаметр 60 мм и стенки толщиной 30 мм. Камера выдерживала 7–8 взрывов, не разрушаясь.

Продукты детонации истекали из зарядной камеры в цилиндрический канал, представляющий собой горизонтально расположенную стальную трубу, внутренний диаметр которой составляет 120 мм, длина – 4 м и толщина стенок – 15 мм. Торцы трубы со стороны, противоположной заряду, был открытым. Центральные оси заряда и трубы совпадали. По длине трубы располагались 5 высокочастотных пьезокварцевых датчиков давления марки AVL или Т-6000; расстояния от открытого торца заряда до датчика (X) равнялось, как правило, 0.8, 1.3, 1.8, 2.55, 3.3 и иногда 3.8 м. Сигналы с датчиков поступали на усилитель электрического заряда и регистрировались с помощью быстродействующего аналого-цифрового преобразователя на компьютере.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Предварительно была измерена скорость детонации базового состава 31.5%Al + 38.5%Т + 30%Г с помощью ждущего щелевого фоторегистратора ЖФР-3. Использовали заряд без оболочки диаметром 23 мм и плотностью 1.96 г/см³, для инициирования был взят бустер из прессованного тротила массой 8 г, описанный выше. Опыты показали, что детонация быстро выходит на установившийся режим, распространяясь вдоль заряда с постоянной скоростью, равной ~4300 м/с. Измеренная величина значительно уступает идеальной скорости детонации, которая была рассчитана для указанной смеси с помощью термодинамической программы TDS [3] в предположении полного химического равновесия и оказалась равной ~6500 м/с. Это различие позволяет сделать вывод о том, что детонация исследуемой смеси протекает в неидеальном режиме, при значительном недогорании компонентов. Косвенным свидетельством недогорания было интенсивное свечение, зарегистрированное в процессе фотосъемки после прохождения детонации, что скорее всего может быть вызвано горением продуктов неполного реагирования при их смешении с воздухом.

Пример регистрограмм представлен на рис. 1 в двух видах: в исходном виде и после того как исходные сигналы были подвергнуты процедуре сглаживания по 10 точкам. Давление на фронте взрывной волны определяли по точке с максимальным давлением на сглаженной кривой, импульс давления находили путем интегрирования кривой по времени. Отметим, что процедура сглаживания не изменяет величину импульса. Записи давления, получаемые двумя соседними датчиками, позволяют рассчитать среднюю (на данной измерительной базе) скорость взрывной волны. Если воспользоваться известным соотношением между скоростью и давлением воздуш-

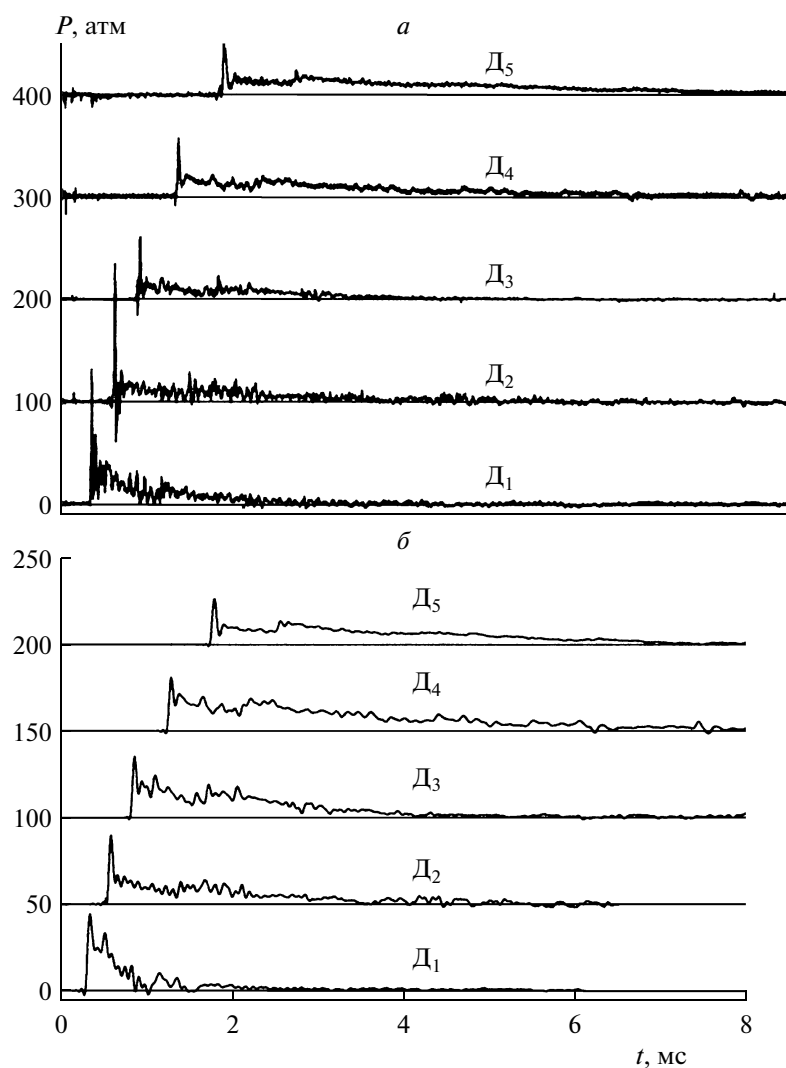


Рис. 1. Экспериментальные профили давление–время для взрывной волны, образовавшейся в канале при детонации цилиндрического заряда плотностью 1.96 г/см^3 (состав $31.5\% \text{Al} + 38.5\% \text{T} + 30\% \text{Г}$, опыт № 1). *a* – исходные записи; *б* – записи, сглаженные по 10 точкам.

ной ударной волны [4], то можно применить эти данные для оценки давления на фронте волны. Было показано, что измеренные значения находятся в хорошем согласии с результатами этой оценки, что является косвенным подтверждением корректности измерений.

Параметры взрывных волн, измеренные для исследуемых составов, сопоставлялись с аналогичными данными, полученными при тех же расстояниях на зарядах той же массы (100 г суммарно с бустером) из мелкодисперсного прессованного порошка тротила плотностью 1.5 г/см^3 . Избыточное давление на переднем фронте волны и импульс давления в зависимости от расстояния до заряда, полученные при детонации тротила и осредненные по трем параллельным опытам, приведены на рис. 2. Эти данные были исходны-

ми при определении относительных величин давления на переднем фронте (P/P_{TNT}) и импульса давления (I/I_{TNT}), которые были использованы в качестве характеристик, позволяющих оценить эффективность исследуемых смесей по сравнению с тротилом. Кроме того, эти данные позволили по величине среднеквадратичного отклонения оценить погрешность измерений, которая в данной серии составила 5% для давления на фронте волны и 11% для импульса давления.

Результаты измерений и их обработки для четырех опытов, различающихся маркой алюминия и составом смеси, приведены в таблице и на рис. 3–6. В столбцах таблицы даны номер опыта, состав смеси и плотность заряда, марка алюминия, расстояния X от торца заряда до точек, где размещены датчики давления, измеренные величины дав-

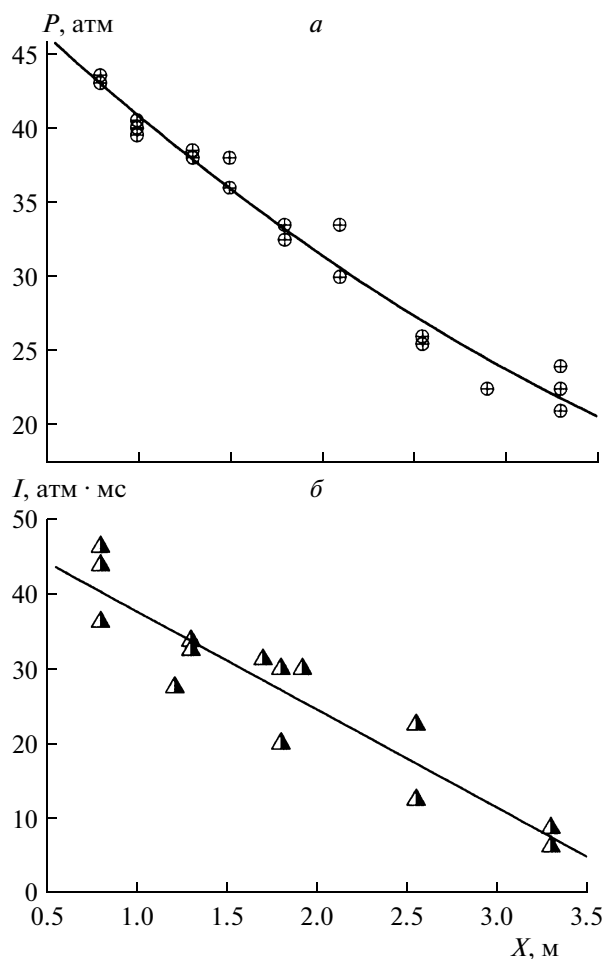


Рис. 2. Давление на переднем фронте (а) и импульс давления (б) в зависимости от расстояния до заряда для 100-граммовых прессованных зарядов тротила плотностью 1.5 г/см^3 . Три параллельных опыта. Установка “цилиндрическая труба”.

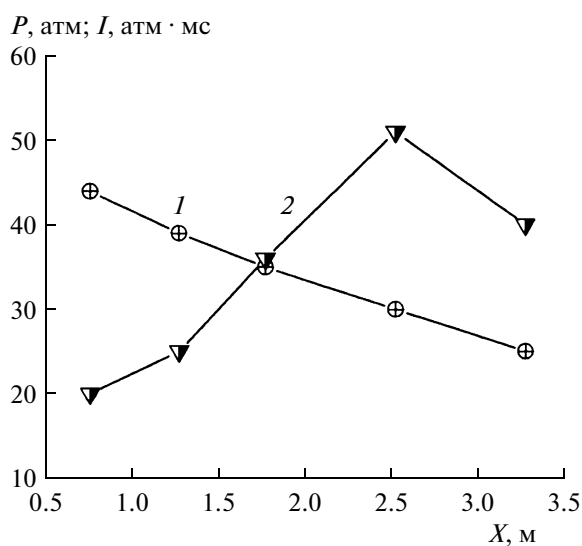


Рис. 3. Давление на переднем фронте (1) и импульс давления (2) в зависимости от расстояния до заряда. Установка “цилиндрическая труба”, состав $31.5\% \text{ Al} + 38.5\% \text{ T} + 30\% \text{ Г}$, опыт № 1, алюминий марки ПАП-2.

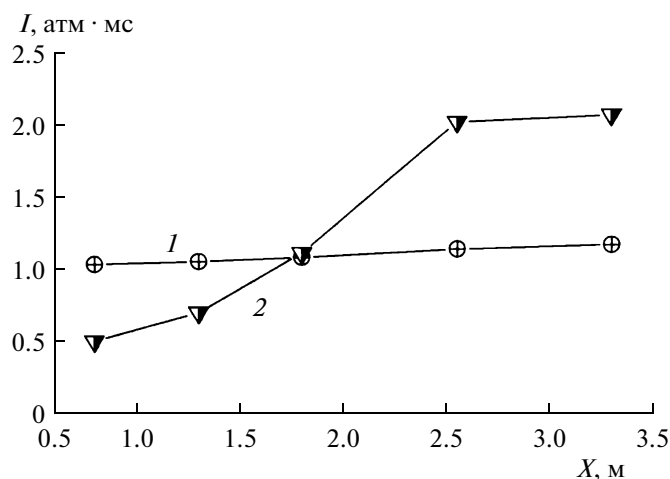


Рис. 4. Относительные величины давления на переднем фронте (1) и импульса давления (2) в зависимости от расстояния до заряда. Установка “цилиндрическая труба”, состав 31.5%Al + 38.5%Т + 30%Г, опыт № 1, алюминий марки ПАП-2.

ления на фронте и импульса давления взрывной волны, а также относительные величины этих параметров. На рис. 3 представлены данные по давлению на переднем фронте и импульсу давления

взрывной волны в зависимости от расстояния до заряда для состава 31.5%Al + 38.5%Т + 30%Г (опыт 1, алюминий марки ПАП-2). Соответствующие относительные величины P/P_{TNT} и I/I_{TNT}

Характеристики исследованных составов и результаты опытов

Номер опыта	Параметры заряда		Параметры взрывной волны в трубе				
	состав смеси (плотность заряда в г/см ³)	марка алюминия	X, м	давление на фронте, (P), атм	импульс давления (I), атм мс	P/P_{TNT}	I/I_{TNT}
1	31.5%Al + 38.5%Т + 30%Г (1.96)	ПАП-2	0.80	44	20	1.03	0.5
			1.30	39	25	1.05	0.7
			1.80	35	36	1.08	1.11
			2.55	30	50	1.14	2.02
			3.30	25	40	1.17	2.07
2	31.5%Al + 38.5%Т + 30%Г (1.96)	АСД-6	1.30	56	—	1.4	—
			1.80	41	23	1.26	0.72
			2.55	26.5	29	1.07	1.17
			3.30	23.9	28	1.1	1.45
			3.80	23.5	32	1.2	52.55
3	31.5%Al + 38.5%Т + 30%Г (1.96)	ПАП-2 : АСД-6 (1 : 1)	1.80	43	—	1.3	—
			2.55	37	29	1.4	1.18
			3.30	29	28	1.36	1.45
			3.80	23	28	1.21	2.24
			4	18%Al + 52%Т + 30%Г (1.92)	АСД-6	0.80	55
1.30	44	30	1.13			0.8	
1.80	38	22	1.17			0.7	
2.55	34	41	1.29			1.65	
3.30	26	38	1.22			1.97	

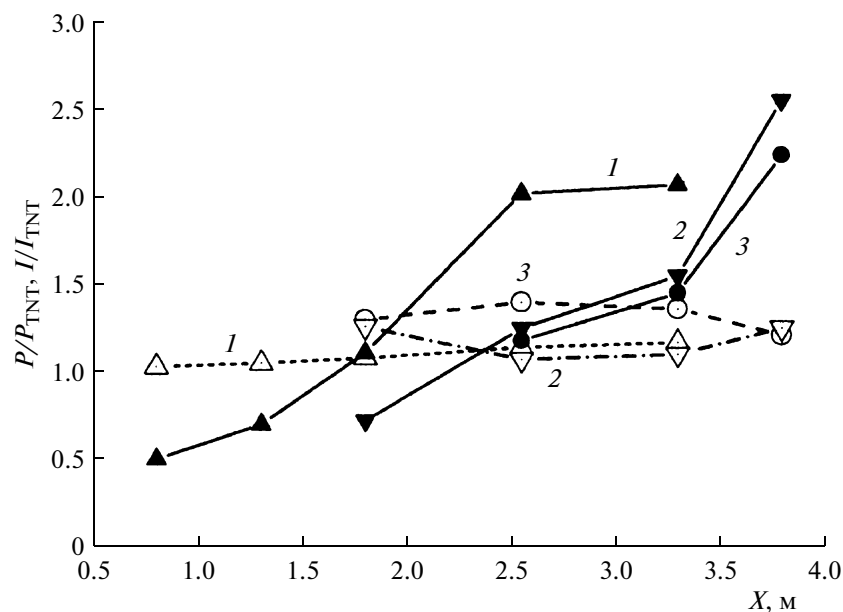


Рис. 5. Относительные величины давления на переднем фронте (светлые символы) и импульса давления (темные символы) в зависимости от расстояния до заряда. Установка “цилиндрическая труба”, состав 31.5%Al + 38.5%Т + 30%Г с частицами алюминия разной формы: ПАП-2 (1), АСД-6 (2), смесь ПАП-2 и АСД-6 в пропорции 1 : 1 (3).

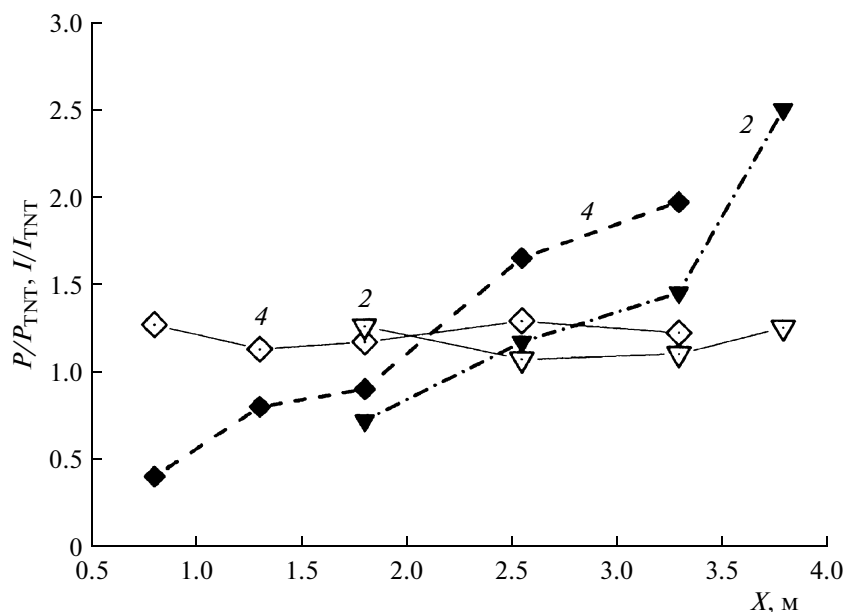


Рис. 6. Относительные величины давления на переднем фронте (светлые символы) и импульса давления (темные символы) в зависимости от расстояния до заряда. Установка “цилиндрическая труба”. Два состава с порошком алюминия марки АСД-6: 31.5%Al + 38.5%Т + 30%Г (2) и 18%Al + 52%Т + 30%Г (4).

для этого состава даны на рис. 4. Видно, что по мере того как увеличивается расстояние и, соответственно, уменьшается давление на фронте волны в диапазоне 44–25 атм, величина P/P_{TNT} остается немного выше единицы, демонстрируя тенденцию к слабому росту.

Что касается импульса давления, то он по мере увеличения расстояния заметно возрастает. Как следствие, относительный импульс давления в том же диапазоне расстояний демонстрирует более чем 4-кратный рост, изменяясь от 0.5 до 2.07. При этом на расстояниях до 1.8 м величина I/I_{TNT}

остается меньше единицы, т.е. импульс давления взрывной волны, генерируемой при детонации смеси, остается ниже, чем в опыте с тротилом. И лишь на расстояниях более 2 м достигается более чем двукратное превышение по импульсу давления относительно тротила. Отметим, что рост импульса давления происходит главным образом благодаря увеличению длительности волны. Аналогичные закономерности наблюдаются и в остальных опытах.

Результаты, приведенные на рис. 5, показывают, что изменение формы частиц (марки) алюминия оказывает достаточно умеренное влияние на характеристики взрывной волны. При этом, если по величине P/P_{TNT} преимущество имеет состав № 3, в котором использована смесь порошков марок ПАП-2 и АСД-6 в пропорции 1 : 1, то по величине относительного импульса давления I/I_{TNT} более высокие значения демонстрирует состав № 1 с алюминием марки ПАП-2.

Влияние состава смеси иллюстрируется на рис. 6. В обоих сравниваемых составах: 31.5%Al + 38.5%Т + 30%Г (опыт № 2) и 18%Al + 52%Т + 30%Г (опыт № 4), различающихся содержанием алюминия и тефлона, использован алюминиевый порошок марки АСД-6. В целом составы дали приблизительно одинаковые давления на фронте волны, однако импульс давления оказался выше у состава со стехиометрическим содержанием алюминия.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Измерены параметры взрывных волн, генерируемых в цилиндрическом канале при расширении продуктов неидеальной детонации зарядов, изготовленных путем прессования из мелкодисперсных порошков тефлона, алюминия и гексогена. Давление на фронте волны и импульс давления, измеренные в нескольких точках по длине заряда, соотносились с аналогичными параметрами взрывных волн, получаемых при детонации заряда тротила одинаковой массы, равной 100 г. Относительные величины давления и импульса использованы как мера при оценке эффективности взрывной волны. Исследование охватывает диапазон давлений от 20 до 50 атм. Изучены две смеси: базовый состав 31.5%Al + 38.5%Т + 30%Г имеет заметный избыток алюминия, тогда как в составе 18%Al + 52%Т + 30%Г соотношение алюминий/тефлон отвечает стехиометрии. В опытах также варьировали форму частиц алюминия; с этой целью использовались мелкодисперсные порошки марки ПАП-2 с частицами в виде чешуек и марки АСД-6 с частицами сферической формы. Результаты измерений представлены в виде

зависимости относительных величин давления на фронте и импульса давления взрывной волны от расстояния, пройденного волной вдоль канала.

Получены следующие результаты:

Для исследованных смесей давление на переднем фронте волны превышает давление при взрыве тротила в среднем на 10–30% почти независимо от расстояния, пройденного вдоль трубы. Зависимость амплитуды волны от формы частиц и содержания алюминия оказалась слабой; давление, измеренное для состава 31.5%Al + 38.5%Т + 30%Г с алюминием в виде смеси порошков марок ПАП-2 и АСД-6, оказалось наиболее высоким.

Импульс давления взрывных волн для исследованных смесей возрастает по мере увеличения пройденного расстояния, что разительно отличается от данных для волны, создаваемой взрывом тротила, когда импульс давления монотонно уменьшается по мере увеличения расстояния. Относительный импульс давления растет от 0.5–0.7 до 2.1–2.5 при изменении расстояния от 0.8 до 3.8 м. Значения относительного импульса, меньшие единицы, получены на расстояниях до 2 м. Совокупность данных по параметрам взрывных волн и по скорости детонации, измеренной для смеси 31.5%Al + 38.5%Т + 30%Г, свидетельствуют о том, что в детонационной волне реагирует в основном гексоген. Химическое взаимодействие алюминия и тефлона начинает проявляться с задержкой, на стадии разлета продуктов детонации, когда фронт взрывной волны успевает пройти вдоль трубы расстояние, составляющее почти 2 м. Можно предположить, что именно активное горение частиц алюминия в среде фтора, который образуется при разложении тефлона в продуктах детонации, оказывает ощутимую поддержку взрывной волне, увеличивая ее длительность и создавая значительный прирост импульса давления.

Данные, полученные на составах с тефлоном, можно сопоставить с результатами аналогичного исследования, выполненного ранее на составах, где вместе с алюминием и гексогеном использовался перхлорат аммония [1]. Опыты проводились в той же установке “цилиндрическая труба” на прессованных зарядах, результаты измерений также соотносились с данными для тротила. Было показано, что относительное давление на фронте волны проявляет слабую чувствительность к изменению расстояния вдоль трубы и соотношению компонентов смеси и лежит в диапазоне 1.4–1.8, т.е. имеет более высокое значение, чем для составов с тефлоном. Импульс давления уменьшается по мере увеличения расстояния от заряда. При этом величина относительного импульса с учетом разброса равномерно распределена по длине трубы, покрывая диапазон от 1.5 до 2 м и

более, а участок с $I/I_{\text{TNT}} < 1$, который наблюдается для составов с тефлоном при расстояниях до 2 м, на композициях с перхлоратом аммония отсутствует. Эти различия позволяют предположить, что перхлорат аммония быстрее и активнее вступает в химические реакции по сравнению с тефлоном, оказывая значительный вклад в амплитуду и импульс взрывной волны уже непосредственно при ее формировании.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сулимов А.А., Борисов А.А., Ермолаев Б.С. и др. // Хим. физика. 2009. Т. 28. № 9. С. 74.
2. Борисов А.А., Сулимов А.А., Сукоян М.К. и др. // Хим. физика. 2009. Т. 28. № 11. С. 64.
3. Викторов С.Б., Губин С.А., Маклашова И.В. и др. // Хим. физика. 2005. Т. 24. № 12. С. 22.
4. Баум Ф.А., Орленко Л.П., Станюкович К.П. и др. Физика взрыва / М.: Наука, 1975.