

ГОРЕНИЕ, ВЗРЫВ И УДАРНЫЕ ВОЛНЫ

УДК 541.126.662.21

КОНВЕКТИВНОЕ ГОРЕНИЕ И ДЕТОНАЦИОННАЯ СПОСОБНОСТЬ СМЕСЕЙ ПЕРХЛОРАТ АММОНИЯ–АЛЮМИНИЙ–НИТРОМЕТАН, БОГАТЫХ АЛЮМИНИЕМ. 1. ЭКСПЕРИМЕНТ

© 2011 г. П. В. Комиссаров, Г. Н. Соколов, Б. С. Ермолаев*, А. А. Борисов

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

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

Поступила в редакцию 03.12.2010

Экспериментально исследованы инициирование и распространение низкоскоростной детонации в смесях перхлорат аммония (ПХА) – алюминий с добавками нитрометана (НМ) с отношением ПХА/Al от 1/1 до 1/2.5 и пористостью от 40 (10 вес.% НМ) до 0% (40 вес.% НМ) в прочных стальных оболочках на воздухе и в пластиковых оболочках под водой. Определены оптимальные содержания компонентов, обеспечивающие надежное инициирование стационарной детонации (со скоростями от 2 до 5 км/с) слабыми взрывными источниками в смесях с отношением ПХА/Al = 1 : 1 и выше. Выбранные смеси воспроизводимо детонируют в пластиковых оболочках, окруженных слоем воды толщиной 30 см со скоростями, несколько меньшими, чем в прочных стальных оболочках на воздухе.

Ключевые слова: перхлорат аммония, алюминий, нитрометан, смеси, горение конвективное, детонация.

Одним из наиболее перспективных путей повышения энергетики взрывчатых систем правомерно считается включение в реакцию окислителя, содержащегося в среде, в которой производится взрыв. Для взрывов в воздухе эффективность такого подхода продемонстрирована на примере так называемых топливовоздушных взрывчатых систем (ТВС) [1–4]. Однако вариант с созданием облака ТВС и ее последующей детонацией, часто применяемый на практике, при подводных взрывах не может рассматриваться как перспективный по многим причинам. Во-первых, скорость смещения расширяющихся продуктов первичного взрыва с водой очень мала для того, чтобы создать слой сколь-нибудь существенных размеров, способный реагировать с водой и состоящий из смеси водяного пара с разбрасываемым материалом. Во-вторых, наиболее перспективными компонентами продуктов первичного взрыва могут быть только частицы металлов, реакция которых с водой идет с выделением тепла. Частицы металла требуют инициирования реакции со скоростями, необходимыми для генерации импульсов давления высокой амплитуды и высокой температуры. Требуемые скорости реакции сильно ограничивают время, отведенное на смешение, так как окружающая среда сильно поглощает тепло. Таким образом, использовать тепло, выделяющееся при реакции в расширяющихся продуктах первичного взрыва металлических частиц с водой, можно только на стадии, когда температура продуктов, смешанных с парами воды, еще достаточно высока для воспламенения частиц металла. При этом

задержки воспламенения должны быть меньшими, чем время гидродинамической разгрузки объема, в котором протекает реакция. Это означает, что начальная поверхность смешения должна быть на несколько порядков величины больше, чем гладкая поверхность границы газового пузыря, обрабатывающегося при взрывах нормально детонирующих зарядов.

На основании вышесказанного можно утверждать, что реализация дополнительной энергии за счет реакции компонентов продуктов с окружающей их водой накладывает очень жесткие требования на взрывчатые системы и заряды из них. Во-первых, заряды должны содержать большое количество частиц металла для получения заметного эффекта. При этом они должны или детонировать, или быстро сгорать, создавая высокое давление в килобарном диапазоне и разогревая частицы металла до температур воспламенения, необходимых для сгорания частиц при расширении продуктов в смеси с водой, а также с задержками, меньшими, чем время газодинамической разгрузки образующегося облака гетерогенной смеси. Во-вторых, взрыв заряда должен произойти так, чтобы продукты с самого начала разлетались в виде глубоко проникающих в воду струй, резко увеличивающих поверхность смешения. Для этого давление при взрыве должно быть достаточно высоким, но не на столько, чтобы сразу сформировать практически ламинарное течение расширяющихся продуктов. Распространение волны реакции по заряду в пульсирующем режиме и разрыв оболочки заряда на достаточно

крупные фрагменты могут обеспечить необходимые скорость и объем слоя смешения. Наиболее подходящими для таких зарядов можно считать смеси твердого окислителя, например перхлората аммония (ПХА), алюминия и жидкого компонента, например, нитрометана (НМ), который обеспечивает низкую пористость пастообразных зарядов при сохранении приемлемой их детонационной способности.

Инициирование и распространение детонации и быстрого конвективного горения в таких трехкомпонентных смесях с избытком алюминия практически не исследованы. Поэтому проведено экспериментальное исследование с целью выяснения возможных режимов детонации в таких системах и обеспечения хотя бы минимального набора данных для проведения теоретического анализа механизма распространения детонационных волн и оценки их параметров.

ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ НЕИДЕАЛЬНОЙ ДЕТОНАЦИИ ТРОЙНЫХ СМЕСЕЙ В ПРОЧНЫХ ОБОЛОЧКАХ

Как отмечалось выше, неидеальная детонация богатого алюминием смесевого заряда — наиболее выгодный для генерации импульсов давления режим. При этом заряд должен быть достаточно плотным, что может быть легко достигнуто путем введения жидкого или пластического компонента. В проведенных экспериментах основным таким компонентом был нитрометан. Целью исследования было выяснить:

— при каком максимальном количестве металла в смеси она останется детонационноспособной;

— при какой пористости (плотности) заряда и в каком его окружении (прочная стальная, пластиковая или водная оболочка) детонация в нем может быть возбуждена и будет распространяться стационарно;

— каковы скорости детонации при различном содержании компонентов, и насколько они отличаются от идеальных значений Чепмена—Жуге (т.е. насколько полно реагирует смесь непосредственно за фронтом детонации и сколько ее остается для реакции в расширяющихся продуктах детонации).

Для этого были разработаны методика измерения скорости детонации в смесях, детонирующих с низкими скоростями в оболочках различной прочности (стальных и пластиковых), и способ инициирования смесей источниками энергии, генерирующими волны давления с параметрами, приближающимися к тем, которые ожидаются в детонационных волнах исследуемых смесей. Последнее необходимо по двум причинам. Во-первых, при слишком высокой энергии инициатора трудно убедиться в том, что волна детонации в испытуемом заряде вышла на стационарный режим в пределах его ограниченной длины. Во-вторых, для надежного измерения скорости необходимо, чтобы волна детонации распростра-

нялась в неидеальном режиме от начала заряда, с неполным энерговыделением до плоскости Чепмена—Жуге, что может быть достигнуто при длительном так называемом “мягком” иницирующем импульсе.

Методика измерения скорости детонации в составах, сильно переобогащенных алюминием

Для измерения скорости процесса детонации была выбрана оптоволоконная методика. Опыты проводились в стальных трубах длиной 40 см, внутренним диаметром 10 и 18 мм и толщиной стенок соответственно 3 и 6 мм, а также в полиэтиленовых трубах диаметром 20 мм с толщиной стенки 6 мм. Вдоль труб просверливались по 8 отверстий диаметром 0.25 мм, в которые клеивались оптические поликарбонатные волокна. Особенностью заделки оптоволокон в отверстия была неполная глубина вклейки, которая выбиралась таким образом, что срез волокна располагался на расстоянии, большем двух диаметров заряда, от внутренней стенки трубы. Таким образом, перед волокном всегда находился воздушный пузырек, препятствующий смачиванию волокна нитрометаном, размягчающим поликарбонат. Трубы заполнялись смесью и инициировались в вертикальном положении во избежание попадания смеси и особенно нитрометана в отверстие оптоволокон. Для увеличения количества регистрируемых моментов прохождения детонационной волны сигналы от нескольких волокон фиксировались одним фотодиодом. При этом такие волокна устанавливались поочередно с другими, сигналы которых регистрировались другим фотодиодом. При проведении опытов со смесями, содержащими большое количество избыточного алюминия (для последующего дореагирования с окружающей водой), необходимо было найти способ обработки сигналов фотодиодов, который позволил бы отличить паразитные сигналы от ярко светящихся разлетающихся продуктов (алюминия, сгорающего в воздухе), регистрируемые через оторванные взрывом волокна от предыдущих отверстий в оболочке, от сигналов с последующих волокон. Кроме того, слабое свечение и неоднородность зоны реакции приводили к довольно низкому отношению полезный сигнал/шум в некоторых опытах, поэтому для выделения полезных сигналов пришлось применить процедуру сглаживания сигнала, которая, как это видно на рис. 1, оказалась весьма эффективной.

В ряде опытов применялись цифровые методы сглаживания сигнала и фильтрации шумов. Из двух использованных процедур сглаживания, алгоритма быстрого преобразования Фурье (FFT) и алгоритма Савицкого—Голая (S-G), последний оказался предпочтительнее. Однако иногда, особенно когда волна распространяется с переменной скоростью, трудно выделить полезные сигналы с помощью S-G-сглаживания оказалось невозможно. В этом слу-

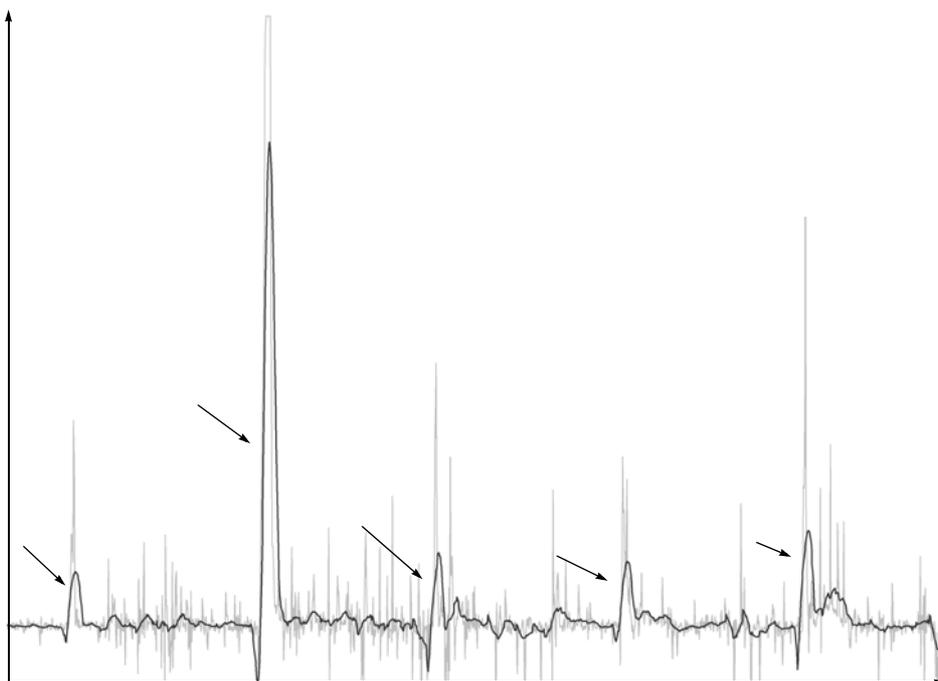


Рис. 1. Пример сглаживания регистрируемого сигнала. Стрелками указаны пики, соответствующие полезному сигналу.

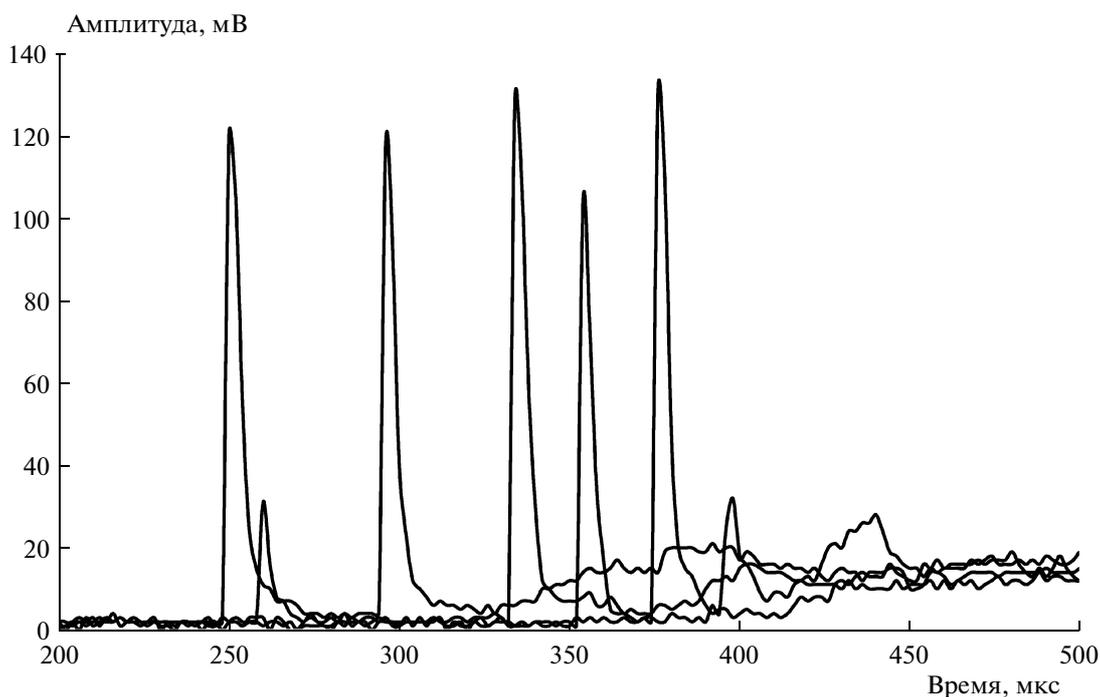


Рис. 2. Наблюдаемые формы сигналов свечения при детонации смесей.

чае использовалась FFT-процедура начального уменьшения шума, поскольку обычно частоты, присущие полезным сигналам, существенно отличались от характерных частот шума. После этого сигнал подвергался S-G-сглаживанию. Примеры

регистрируемых сигналов приведены на рис. 2. Как видно, форма сигнала свечения довольно сложная. Сигнал плавно возрастает до пикового значения, поскольку на фотодиод поступает свет из некоторого телесного угла, ограниченного длиной и диамет-

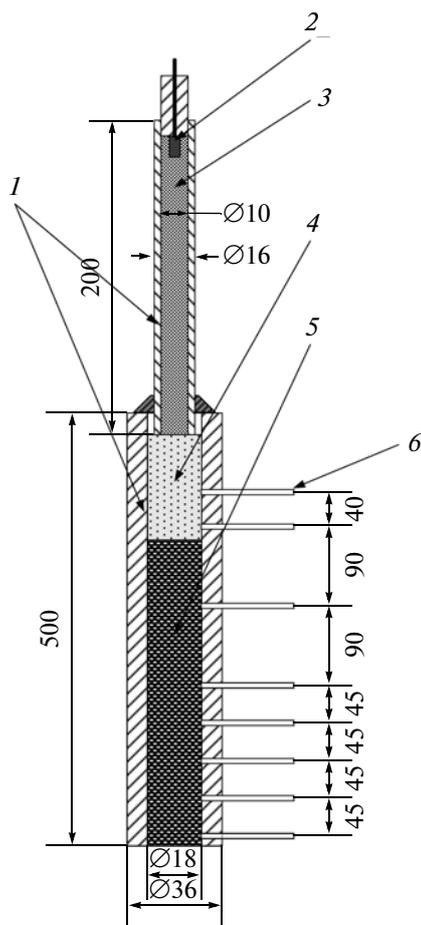


Рис. 3. Заряд в прочной оболочке с оптоволоком для измерения скорости процесса взрыва. Инициатор, в котором происходит переход горения в детонацию, расположен в верхней части рисунка. Размеры указаны в миллиметрах; 1 – стальная трубка, 2 – воспламенитель, 3 – стехиометрическая смесь Al/ПХА, 4 – стехиометрическая смесь Al/ПХА + 4.6% керосина, 5 – богатая металлом исследуемая смесь, 6 – оптоволокна.

ром отверстия между волокном и внутренней стенкой оболочки. Для определения времени прибытия волны на место установки оптоволокон выбирался момент появления перегиба на возрастающей части наблюдаемого сигнала (время максимальной скорости роста интенсивности излучения). Исследования проводились с неоднородными смесями, компоненты которых за фронтом волны начинали реагировать не одновременно. Это приводило к искажению формы регистрируемого сигнала. Появление пика свечения, часто предшествующего основному, можно объяснить неоднородностью довольно протяженной зоны реакции, в которой присутствуют как светящиеся объемы, так и не реагирующие (не светящиеся). Не исключено также, что реагирование компонентов в неоднородной смеси может привести к струйному механизму распространения волны. И в этом случае

применялась та же самая процедура (по основному пику) определения момента прибытия волны.

Разработка “мягкого” иницирования

Как отмечалось выше, небольшие размеры заряда в лабораторных исследованиях и широкие зоны реакции в детонационных волнах накладывают специальные ограничения на конструкцию инициатора: он не должен генерировать сильно пересжатую детонацию на начальной стадии. При этом импульс должен быть длительным, чтобы реакция в иницированной волне успевала завершиться до стадии, характерной для стационарной детонационной волны. Слабые оболочки, которые неизбежно должны использоваться при практическом применении зарядов, подобных исследованным, также требуют иницирующего импульса большой длительности. Поэтому применялся инициатор, детонация в котором возбуждается путем перехода горения в детонацию. На выходе детонационная волна имеет скорость на уровне 4–4.5 км/с, а плотность продуктов и длина зоны реакции в ней близки к характерным для детонационных волн в исследуемых смесях. В качестве инициатора был выбран заряд стехиометрической смеси алюминия (ПАП-2) и ПХА (частицы размером около 40 мкм), плотность и пористость которой регулировалась добавками керосина. Заряд был заключен в стальную трубку внутренним диаметром 10 мм.

На рис. 3 показана схема заряда в оболочке. Опыты проводились со смесями алюминия (ПАП-2) и ПХА (со средним размером частиц менее 40 мкм, 80% частиц имеют размер в интервале 30–40 мкм). Просеянный порошок ПХА выдерживался в течение двух дней в сушильном шкафу при температуре 90°C. Смесь приготавливалась следующим образом: сначала смешивались сухие компоненты и смесь высыпалась на противень в виде слоя толщиной около 2 мм. Затем на слой равномерно наливался нитрометан и полученная композиция покрывалась полиэтиленовой пленкой. Затем слой, насыщенный в течение получаса нитрометаном, сворачивался в шар и разминался вручную. Полиэтиленовая пленка удалялась непосредственно перед загрузкой смеси в оболочку. Такая процедура обеспечивала приемлемую равномерность распределения компонентов по заряду и предотвращала испарение нитрометана. Смесь вводилась порционно с контролем плотности каждой порции. Однородный заряд с изменением плотности по длине, составляющим не более 2%, получался, когда высота порций была не более диаметра заряда. Проверка показала, что заряд не расслаивался в течение двух дней, а концентрация нитрометана в нем не изменялась независимо от ориентировки заряда. Для смесей с соотношением Al/ПХА более 1.5/1 применялся загущенный 2% полиметилметакрилата нитрометан.

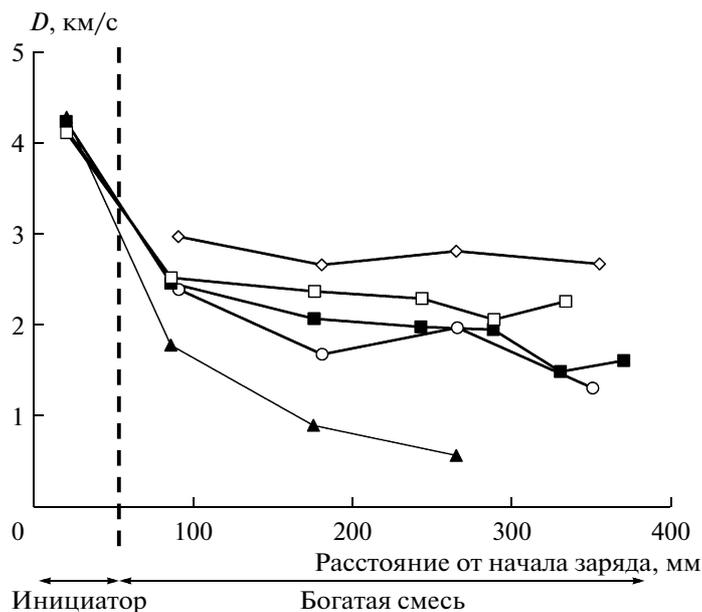


Рис. 4. Скорость детонации в зависимости от расстояния в зарядах с одинаковой концентрацией НМ (10%) и различным отношением Al/ПХА: \diamond – Al/ПХА = 1/1, \square – Al/ПХА = 2/1, \blacktriangle – Al/ПХА = 2.5/1, \blacksquare – Al/ПХА = 1.8/1, \circ – Al/ПХА = 1.5/1.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Изучалось влияние концентрации алюминия и нитрометана на характеристики детонации смеси. Нужно было определить, при каких концентрациях компонентов смеси можно считать детонационно-способными. На первом этапе опыты проводились с зарядами в стальных трубах диаметром 18 мм.

Все опыты были разделены на несколько серий. В первой серии опыты проводились со смесями, содержащими 10% нитрометана¹⁾, с изменением отношения Al/ПХА в диапазоне от 1/1 до 2.5/1. Во второй серии в смесях с отношением Al/ПХА, равным 1/1, изменялось содержание нитрометана от 10 до 40% (при этом пористость смеси уменьшалась от 40% до 0). В третьей и четвертой сериях содержание нитрометана также увеличивалось от 10 до 40%, но в смесях с Al/ПХА, равных 2/1 и 2.5/1 соответственно. Остальные серии описаны в таблице, где также приведены данные о плотности смесей (максимально возможной при нулевой пористости и средней по заряду).

Влияние избытка горючего

В этой серии исследовалось влияние избытка алюминия в смеси. Результаты показаны на рис. 4. Вертикальной линией на рисунке обозначена граница между инициирующей стехиометрической и исследуемой смесями в заряде. Видно, что использованный тип инициатора вполне воспроизводимо возбуждает детонацию в смеси, которая распро-

страняется со скоростями на уровне 4 км/с. Траектории волнового фронта демонстрируют, что только смеси с отношением Al/ПХА, равным 1/1 и 2/1, способны поддерживать стационарную детонацию в условиях опыта. Детонация в смеси, более богатой алюминием, затухает. Осколки оболочки при этом имеют вид полос: при скоростях волны менее 2 км/с это полоски длиной около двух диаметров заряда или меньше и шириной от 3 до 8 мм.

Увеличение концентрации НМ до 23% увеличивает скорость детонации (см. рис. 5) на 0.5 или 1 км/с в сравнении со смесью с тем же отношением Al/ПХА, но содержащей 10% нитрометана. Это связано с большей плотностью первой смеси и свидетельствует о ведущей роли нитрометана в распространении и инициировании детонации в смеси. Затухающий режим детонации в смеси с большим содержанием нитрометана наблюдается при большем отношении Al/ПХА. Хотя увеличение концентрации нитрометана в смеси снижает в ней абсолютное содержание алюминия, сравнение графиков на рис. 4 и 5 показывает безусловное преимущество смесей с большим содержанием НМ с точки зрения генерации импульсов давления при подводном взрыве. Кроме того, с практической точки зрения низкопористые смеси технологически более выгодны, поскольку они плотнее, лучше противостоят внешним воздействиям, более однородны, пластичны и удобны для загрузки в оболочку.

Влияние инициатора

Для проверки того, насколько исследуемые смеси чувствительны к инициатору, были проведены опы-

¹⁾ Здесь и всюду в статье содержание нитрометана, алюминия или керосина указано в весовых процентах.

Параметры зарядов

Серия опыта*	Смесь	Al, вес. %	ПХА вес. %	Жидкость, вес. %	Пористость, вес. %	Масса заряда, г	Длина заряда, см	Плотность заряжения, г/см ³	ТМД, г/см ³
1	Al/ПХА = 1/1 + 10% НМ	45.0	45.0	10	40	113	36	1.23	2.06
1	Al/ПХА = 1.5/1 + 10% НМ	54.0	36.0	10	43	110	36	1.21	2.11
1	Al/ПХА = 1.8/1 + 10% НМ	57.8	32.2	10	45	108	36	1.17	2.14
1	Al/ПХА = 2/1 + 10% НМ	60.0	30.0	10	42	113	36	1.25	2.15
1	Al/ПХА = 2.5/1 + 10% НМ	64.3	25.7	10	49	105	37	1.12	2.18
2	Al/ПХА = 1/1 + 17% НМ	41.5	41.5	17	25	135	36	1.46	1.94
2	Al/ПХА = 1/1 + 23% НМ	38.5	38.5	23.0	20	124	33	1.48	1.84
2	Al/ПХА = 1/1 + 30% НМ	35.0	35.0	30.0	5	156	37	1.66	1.75
2	Al/ПХА = 1/1 + 40% НМ	30.0	30.0	40.0	0	162	37	1.75	1.62
3	Al/ПХА = 2/1 + 17% НМ	55.3	27.7	17	33	130	39	1.35	2.01
3	Al/ПХА = 2/1 + 23% НМ	51.2	25.8	23	18	165	39	1.57	1.91
3	Al/ПХА = 2/1 + 30% НМ	46.0	24.0	30	6	180	39	1.69	1.79
3	Al/ПХА = 2/1 + 40% НМ	40.0	20.0	40	0	177	37	1.66	1.66
4	Al/ПХА = 2.5/1 + 23% НМ	55.0	22.0	23	16	165	39	1.62	1.93
5	Al/ПХА = 1/1 + 23% НМ (слабый инициатор)	38.5	38.5	23	14	146	36	1.58	1.84
5	Al/ПХА = 2/1 + 23% НМ (слабый инициатор)	51.2	25.8	23	18	165	39	1.57	1.91
6	Al/ПХА = 1/1 + 10% керосина	45.0	45.0	10	33	125	38	1.31	1.94
7	Al/ПХА = 1/1 + 17% НМ (в воде)	41.5	41.5	17	25	135	36	1.46	1.94
7	Al/ПХА = 2/1 + 23% НМ (в воде)	38.5	38.5	23	16	165	39	1.54	1.84
7	Al/ПХА = 1/1 + 30% НМ (в воде)	35.0	35.0	30	11	141	29	1.55	1.75
7	Al/ПХА = 1/1 + 30% НМ (иницирование, 8 г ВВ)	35.0	35.0	30	11	195	40	1.55	1.75
7	Al/ПХА = 1/1 + 30% НМ	35.0	35.0	30.0	6	150	29	1.65	1.75

* Серии экспериментов: серия 1 – влияние отношения Al/ПХА; серия 2 – варьируется содержание НМ в смеси 1/1; серия 3 – варьируется содержание НМ в смеси 2/1; серия 4 – варьируется содержание НМ в смеси 2.5/1; серия 5 – варьируется мощность инициатора; серия 6 – в смесь введен керосин вместо НМ; серия 7 – вместо стальной оболочки использовалась пластиковая труба.

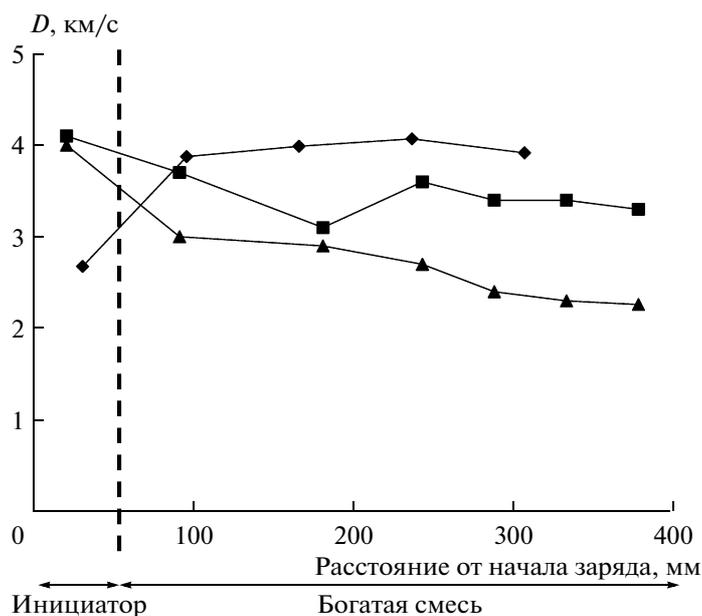


Рис. 5. Скорость детонации в зависимости от расстояния в зарядах с одинаковой концентрацией НМ (23%) и различным Al/ПХА отношением: \blacklozenge – Al/ПХА = 1/1, \blacksquare – Al/ПХА 2/1, \blacktriangle – Al/ПХА 2.5/1.

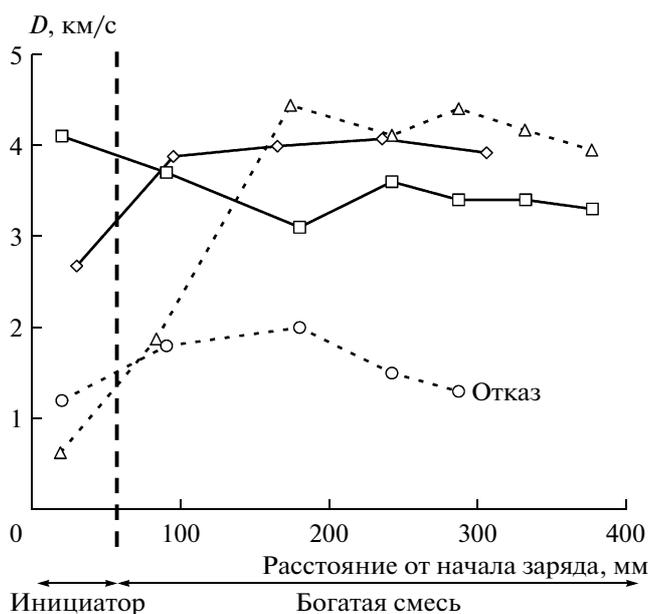


Рис. 6. Сравнение скоростей детонации зарядов одинакового состава (\diamond , \triangle – Al/ПХА = 1/1 + 23% НМ и \square , \circ – Al/ПХА = 2/1 + 23% НМ), инициированных различными источниками энергии: \square , \diamond – переход горения в детонацию в трубке диаметром 10 мм, заполненной стехиометрической Al/ПХА смесью, и \triangle , \circ – заряд дымного пороха весом 2 г.

ты, в которых две наиболее перспективные смеси из второй серии инициировались зарядом дымного пороха. Из рис. 6 видно, что с ростом концентрации алюминия детонация развивается медленнее и затухает на расстоянии, равном приблизительно 15 диаметрам заряда. Следовательно, смеси с отношением Al/ПХА = 2/1 близки к концентрационному пределу

по избытку инертного материала в условиях наших экспериментов.

Влияние содержания нитрометана

Во второй серии опытов при постоянном отношении Al/ПХА для каждой из групп опытов содержание НМ увеличивалось от 10 до 40% (до нулевой

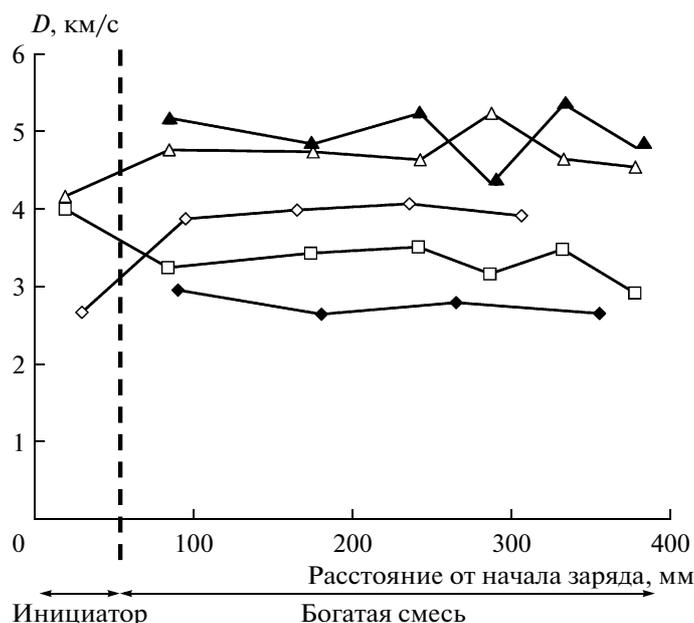


Рис. 7. Влияние содержания НМ в смеси Al/ПХА = 1/1 на скорость детонации: \blacklozenge — 19% НМ (1.23), \square — 17% НМ (1.46), \triangle — 30% НМ (1.66), \diamond — 23% НМ (1.48), \blacktriangle — 40% НМ (1.75). В скобках указана плотность смеси в г/см^3 .

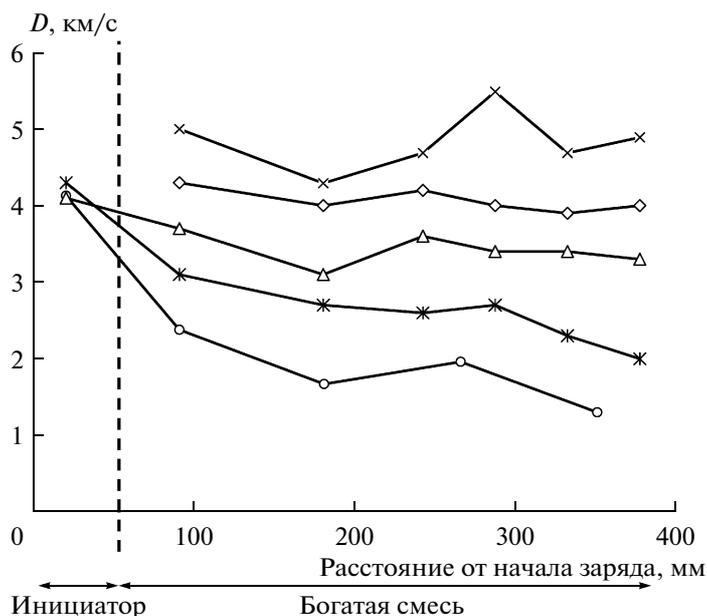


Рис. 8. Влияние содержания НМ в смеси Al/ПХА = 2/1 на скорость детонации: \times — 40% НМ (1.89), \diamond — 30% НМ (1.69), \triangle — 23% НМ (1.54), $*$ — 17% НМ (1.35), \circ — 10% НМ (1.35). В скобках указана плотность смеси в г/см^3 .

пористости). Результаты опытов показаны на рис. 7–9. Детонационные волны в смесях с большим содержанием НМ распространяются более стабильно и с большими скоростями. Наблюдаемые небольшие колебания скорости, по-видимому, связаны с неоднородностью смеси. Более высокая детонационная способность смесей с повышенным содержанием НМ делает их более перспективными

для применения в малопрочных оболочках, несмотря на несколько меньшее содержание в них алюминия.

Как видно из рис. 8, самоподдерживающаяся низкоскоростная детонация распространяется и в смеси с Al/ПХА = 2/1 при увеличении содержания НМ до 23%. Скорости детонации в такой смеси ниже, чем при отношении Al/ПХА, равном 1/1, но она более интересна для применения при взрывах под водой, поскольку содержит 51.3%

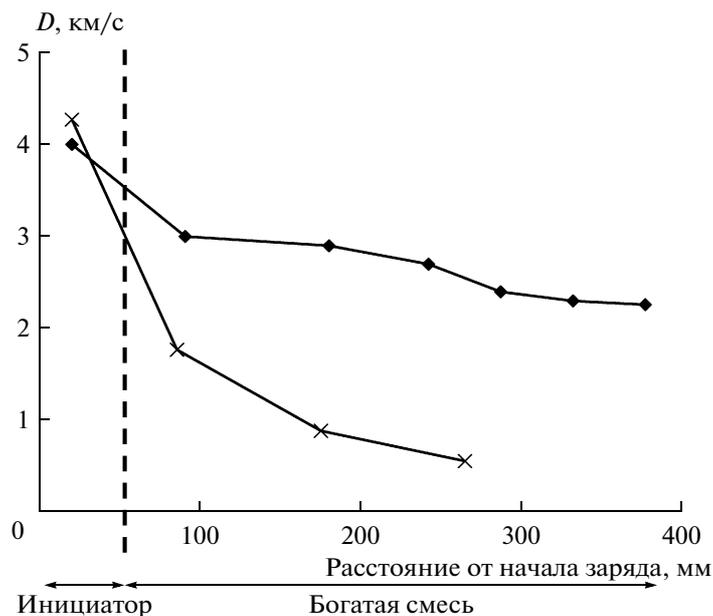


Рис. 9. Влияние содержания НМ в смеси Al/ПХА = 2.5/1 на скорость волны: x – 10% НМ (плотность – 1.13 г/см³), ♦ – 23% НМ (плотность – 1.62 г/см³).

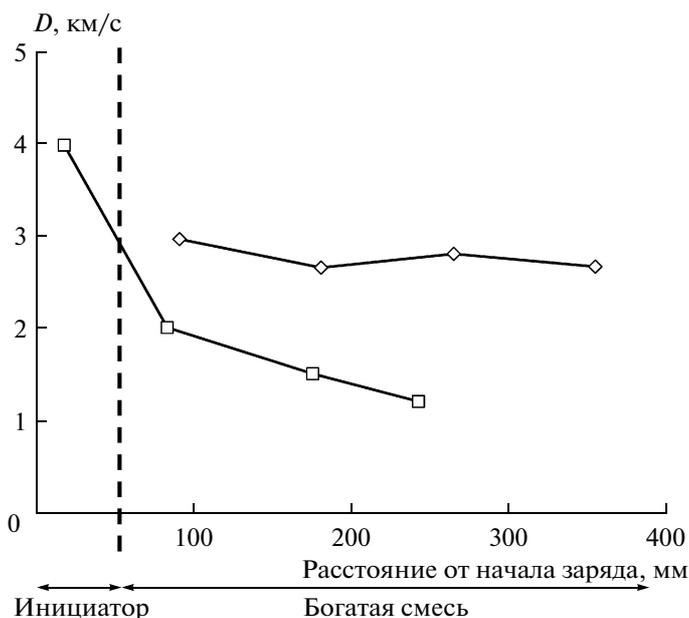


Рис. 10. Сравнение скорости волновых процессов в смесях, содержащих НМ или керосин: при одинаковом отношении Al/ПХА = 1/1 и при одинаковом весовом содержании жидких компонентов: ♦ – Al/ПХА = 1/1 + 10% НМ, □ – Al/ПХА = 1/1 + 10% керосина.

алюминия, и, следовательно, потенциально более энергетична (за счет возможной реакции металла с окружающей водой).

Увеличение содержания металла в смеси до отношения Al/ПХА = 2.5/1 привело к затухающим режимам детонации (рис. 9). Возможно, в более длинных зарядах и в зарядах с большим содержанием

НМ детонация могла бы выйти на стационарный режим, однако возникли технические трудности с обеспечением однородности более “жидких” зарядов, поскольку даже загущенный НМ вытекал из вертикально установленных зарядов, а попытки подпрессовать их заканчивались тем, что поверхность заряда покрывалась жидким НМ.

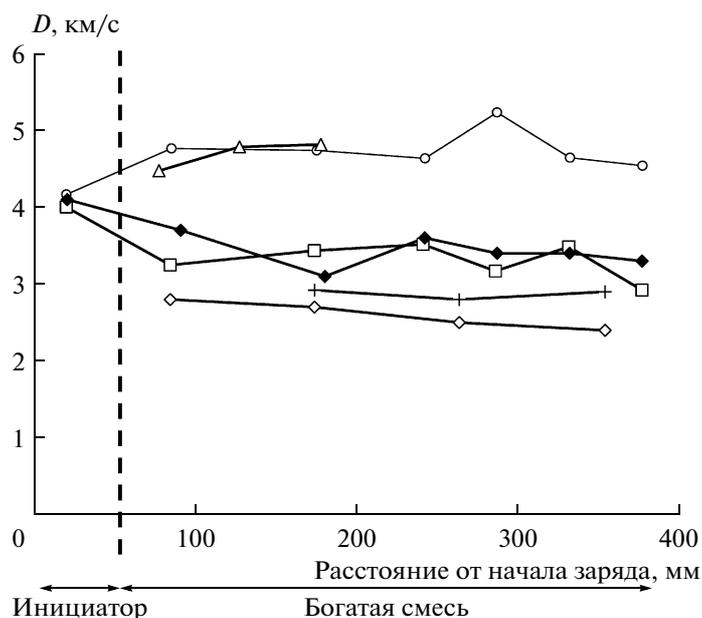


Рис. 11. Сравнение скоростей детонации в смесях с одинаковым содержанием компонентов, измеренных в зарядах в прочных стальных (на воздухе) и пластиковых (в воде) оболочках: □ – Al/ПХА = 1/1 + 17% НМ, ○ – Al/ПХА = 1/1 + 30% НМ, △ – Al/ПХА = 1/1 + 30% НМ (в воде), ⊕ – Al/ПХА = 1/1 + 17% НМ (в воде), ◆ – Al/ПХА = 2/1 + 23% НМ, ◊ – Al/ПХА = 2/1 + 23% НМ (в воде).

Влияние типа жидкой добавки (НМ или керосин)

Для того чтобы подтвердить гипотезу о ведущей роли нитрометана в зоне реакции детонационной волны, был проведен опыт со смесью Al/ПХА = 1/1, в которой НМ был заменен керосином. Как видно из сравнения результатов опытов для смесей с НМ и с керосином на рис. 10, последняя не поддерживает детонацию.

Возможность низкоскоростной детонации в непрочных оболочках (эффект присоединенной массы воды)

Все предыдущие опыты проводились в толсто-стенных стальных оболочках, которые неприемлемы для практического использования зарядов. При подводных взрывах вода, за счет достаточно большой ее массы, может играть роль прочной оболочки, поэтому можно надеяться, что вышеописанные заряды могут детонировать под водой и в слабых пластиковых оболочках.

Как показано на рис. 11, смеси с Al/ПХА = 1/1 и 2/1, содержащие 17, 23 и 30% НМ, плотностью 1.45–1.55 г/см³ действительно способны детонировать в низкоскоростном режиме (неидеальная детонация) в полиэтиленовых оболочках внутренним диаметром 21 мм с толщиной стенок 6 мм, окруженных слоем воды толщиной 30 см. При этом скорости детонации несколько ниже, чем в стальных оболочках на воздухе. Особенно это заметно для смесей

с малым содержанием НМ и высоким содержанием алюминия.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Показана возможность возбуждения и распространения самоподдерживающихся низкоскоростных режимов детонации в смесях перхлорат аммония–алюминий с добавками нитрометана, при взрывах которых под водой избыточный металл может реагировать с окружающей водой, повышая общую энергетику заряда. Важным для практических целей является тот факт, что детонируют смеси с низкой пористостью, содержащие до 55% алюминия. Из совокупности экспериментальных данных следует, что ведущую роль в зоне реакции детонационных волн играет нитрометан. Определен диапазон смесей, детонационная способность и плотность которых и содержание алюминия в них достаточно высоки, чтобы считать их перспективными для генерации импульсов давления высокой амплитуды и длительности при подводных взрывах. В этот диапазон входят смеси с соотношением Al/ПХА = 1/1 и концентрацией нитрометана 17–23% и Al/ПХА = 2/1 с содержанием нитрометана 23–30%. Данные смеси детонируют со скоростями около 3 км/с и выше не только в прочных стальных оболочках, но, что особенно важно, в пластиковых оболочках диаметром 21 мм, будучи погруженными в воду. Присоединенная удельная (на единицу поверхности) масса воды при этом должна быть не

менее массы эквивалентной стальной оболочки. Смеси с высоким содержанием нитрометана детонируют с большими скоростями (до 5 км/с), но могут также представлять практический интерес, несмотря на то, что они содержат меньше алюминия, поскольку они более плотные, генерируют более высокий первичный импульс в воде, их легче инициировать, а температура избыточного алюминия в продуктах их детонации выше (это важно для развития их реакции с окружающей водой). По-видимому, такие составы целесообразно использовать при высоких гидростатических давлениях, в частности для компенсации противодействия при разлете продуктов реакции и предотвращения усадки зарядов в непрочных или негерметизированных зарядах. Как показали опыты с инициаторами раз-

личной интенсивности, вследствие невысокого содержания перхлората аммония испытанные составы не склонны к быстрому переходу горения в детонацию, т.е. являются вполне безопасными в обращении.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Oppenheim A.K.* Dynamics of explosions in FAE mixtures. V. 16. NASA STAR, 1978. № 1.
2. *Lee J.H., Moen I.* Fundamental mechanisms of unconfined detonation in FAE. AFOSR TR-76-1426. 1979.
3. *Гельфанд Б.Е., Сильников М.В.* Объемные взрывы. СПб.: Астерион, 2008.
4. *Комиссаров П.В., Соколов Г.Н., Борисов А.А.* // Хим. физика. 2011. Т. 30. № 2. С. 62.