

ГОРЕНИЕ, ВЗРЫВ И УДАРНЫЕ ВОЛНЫ

УДК 539.63:541.124

СВОЙСТВА НИЗКОСКОРОСТНОЙ ДЕТОНАЦИИ В ПРЕССОВАННОЙ СТЕХИОМЕТРИЧЕСКОЙ СМЕСИ ПЕРХЛОРАТА АММОНИЯ С ПОЛИМЕТАМЕТИЛАКРИЛАТОМ

© 2019 г. Б. С. Ермолаев^{1*}, А. А. Беляев¹, А. В. Романьков¹,
В. Е. Храповский¹, А. А. Сулимов¹, А. Г. Ребеко¹

¹Институт химической физики им. Н.Н. Семёнова Российской академии наук, Москва, Россия

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

Поступила в редакцию 19.12.2018;

после доработки 19.12.2018;

принята в печать 21.01.2019

Низкоскоростная детонация смесей перхлората аммония с горючими добавками в зарядах с высокой относительной плотностью — интересный объект научных исследований, имеющий потенциал для практического применения в импульсных сопловых и метательных устройствах. Вместе с тем информация о процессе до сих пор остается скудной и касается в основном измерений скоростей распространения волны. В данной статье приводятся результаты комплексного исследования, направленного на получение широкого спектра данных о свойствах низкоскоростной детонации (НСД) на примере прессованных зарядов из смеси перхлората аммония с 15% полиметаметилакрилата. Опыты проводились в лабораторном импульсном устройстве с отстрелом массы и в прочных стальных оболочках, снабженных сопловым блоком или метаемым телом, при инициировании через промежуточный заряд из гексогена или из смеси тротил/гексоген 30/70. Регистрировались импульс тяги, траектория разгона метаемого тела, давление и траектория фронта волны НСД. По результатам измерений вычислялись скорость метания, давление, действующее на метаемое тело, и полнота сгорания смеси. В опытах варьировали относительную плотность заряда — от 0.85 до 0.96, размер частиц перхлората аммония — от 20 до 200 мкм, длину заряда и массу метаемого тела. Эксперименты были дополнены численным моделированием. Значительное внимание уделено взаимодействию волны низкоскоростной детонации с торцевыми волнами разрежения. Рассмотрены условия, которые могут обеспечить высокую полноту химического превращения смеси при соблюдении приемлемого уровня максимального давления (1–1.5 ГПа).

Ключевые слова: неидеальная детонация, низкоскоростная детонация, смесевые взрывчатые материалы, перхлорат аммония, пьезокварцевый датчик давления.

DOI: 10.1134/S0207401X19060025

ВВЕДЕНИЕ

Низкоскоростную детонацию (НСД) можно определить как разновидность неидеальной детонации с результативными потерями энергии из-за бокового расширения и сравнительно медленным экзотермическим превращением [1]. Скорость НСД (которая обычно в несколько раз меньше скорости нормальной детонации), давление в волне порядка 1 ГПа и плотное облако горящих частиц энергетического материала, образующихся после прохождения фронта волны НСД, — все эти особенности, присущие НСД, представляют интерес для ряда технических приложений. Однако для реализации практического потенциала НСД требуется прежде всего выполнить два обязательных условия: гарантированное исключение опасности перехода в нормальную детонацию и

достижение полноты химического превращения. Известно, что на поддержание волны НСД расходуется лишь малая часть химической энергии взрывчатого материала, а большая ее часть локализуется в облаке горящих частиц за фронтом волны. При стационарном распространении НСД действует боковое разрежение, и энергия облака фактически оказывается неиспользованной. Если ослабить действие разрежения с тем, чтобы увеличить полноту горения, в облаке начнется рост давления и может возникнуть опасность перехода в нормальную детонацию. Таким образом, реакционную способность взрывчатого материала, предлагаемого для использования в режиме НСД, необходимо оптимизировать с учетом действия волны разрежения.

Первые количественные оценки полноты химического превращения для взрывчатого материала,

сжигаемого в режиме НСД, были получены в лабораторном малогабаритном импульсном устройстве с отстрелом массы, в котором интенсивность торцевой волны разрежения варьировалась за счет изменения массы метаемого тела [1, 2]. Исследование было выполнено на прессованных зарядах из смеси тротил/гексоген 30/70. Показана стабильная работа устройства с режимом НСД. Получены воспроизводимые характеристики по скорости метания и импульсу тяги. Определены условия, в которых полнота сгорания по оценке близка к 100% при максимальном давлении порядка 1 ГПа. Устройство, изготовленное из обычной стали, после опытов не имело следов деформации и применялось многократно.

Использование прессованных смесей на основе перхлората аммония и полимерного горючего позволяет избежать опасности перехода к нормальной детонации при масштабировании (увеличении размеров заряда). Для этих смесей в зарядах диаметром до 50 мм и длиной 200 мм, заключенных в прочные оболочки, при пористости от 15% и ниже нормальная детонация отсутствует; при инициировании возбуждается устойчивая низкоскоростная детонация [2, 3]. Однако опыты, проведенные на смеси перхлората аммония с полиметаметилакрилатом (ПММА) в лабораторном импульсном устройстве с отстрелом массы, показали сравнительно низкую полноту химического превращения [4, 5].

Таким образом, вопрос, касающийся полноты превращения за фронтом волны НСД в смесях перхлората аммония с полимерным горючим, требует специального анализа. Хотя для решения проблемы, возможно, потребуется применить устройство сложной геометрической формы, которые, сочетая действие торцевой и боковой разгрузки, позволят создавать более мягкое и более однородное воздействие на облако горящих частиц, на данном этапе целесообразно рассмотреть простые схемы с торцевой волной разрежения, вызванной движением метаемого тела. Одновременно с полнотой превращения необходимо контролировать давление в камере, с тем чтобы оно не превышало желательный уровень в 1–1.5 ГПа, при котором можно использовать неразрушающиеся стальные оболочки.

В данной работе для исследования выбрана стехиометрическая смесь перхлората аммония с 15% ПММА. Опыты проводились на цилиндрических зарядах диаметром 16 мм и длиной 110–200 мм, заключенных в прочные стальные оболочки, с регистрацией траектории волны через отверстия в оболочке и кривой давления и в лабораторном импульсном устройстве с отстрелом массы с регистрацией импульса тяги, траектории метаемого тела и диаграммы давления. Экспериментальные данные дополнены численным

моделированием. Для проведения расчетов использовалась модель перехода горения в детонацию в индивидуальном взрывчатом материале, разработанная в квазиодномерном приближении [6].

ОПЫТЫ В ЛАБОРАТОРНОМ МАЛОГАБАРИТНОМ ИМПУЛЬСНОМ УСТРОЙСТВЕ С ОТСТРЕЛОМ МАССЫ

Схема лабораторного импульсного устройства, в котором проводились опыты, показана на рис. 1. Устройство состоит из прочной стальной камеры с каналом диаметром 25.5 мм и длиной 50 мм, в который плотно вставляется метаемое тело — стальной цилиндр, имеющий фигурную осевую полость под цилиндрическую часть заряда с торцевой выемкой под капсюль-воспламенитель. Исследуемый заряд изготавливали прессованием в виде двух шашек. Иницирующая шашка имела массу 2 г и прессовалась до плотности 1.52 г/см³ в форме цилиндра диаметром 12 мм и длиной 12 мм из смеси тротил/гексоген 30/70 (средний размер частиц тротила — 20 мкм, частиц гексогена — 60 мкм). Эта шашка размещалась в полости метаемого тела. Основной заряд прессовался из смеси перхлората аммония разной дисперсности с 15% ПММА в виде плоского диска диаметром 25 мм и толщиной до 12 мм. Заряд размещался на дне камеры под метаемым телом. Взрывной процесс инициировался быстродействующим капсюлем марки НХ-ПЧ-А, время срабатывания капсюля составляло не более 0.2 мс. Горение переходит в НСД на длине иницирующего заряда, и далее волновой процесс передается основному заряду. В боковой стенке камеры имелось отверстие для размещения высокочастотного пьезокварцевого датчика давления, работающего в диапазоне до 1–1.3 ГПа. На стенках камеры крепилась сборка из шести контактных датчиков, которая служила для регистрации разгона метаемого тела. Устройство устанавливалось на баллистическом маятнике. В опытах варьировали массу заряда (от 2 до 12 г), массу метаемого тела (от 83 до 222 г), плотность основного заряда (от 1.47 до 1.67 г/см³, относительная плотность — от 0.83 до 0.94) и размер частиц перхлората аммония (от 20 до 200 мкм).

Пример результатов измерений дан в табл. 1 и на рис. 2. В столбцах таблицы соответственно приведены: полная масса заряда, включая воспламенитель; масса метаемого тела; импульс тяги; две величины дульной скорости метаемого тела при вылете: V_d , которую вычисляли по импульсу тяги с поправкой на истечение продуктов взрыва, и V_{56} , которую определяли по траектории метаемого тела; два значения максимального давления в камере: измеренное датчиком давления и рассчитанное по траектории метаемого тела; доля сгоревшего пороха, рассчитанная по дульной скорости.

Способы расчета скорости метаемого тела, давления и доли сгоревшего ВВ подробно изложены в работах [1, 2]. Приведем формулы, используемые для расчета.

Дульная скорость рассчитывалась по формуле

$$V_d = \frac{G - \omega g I_{sp}}{q} \quad (1)$$

Здесь G — импульс тяги в Н · с, ω — масса заряда, q — масса метаемого тела, g — ускорение силы тяжести, I_{sp} — удельный импульс продуктов горения, истекающих после вылета метаемого тела (его величина, по оценке [1], равна 130 с).

Давление рассчитывалось по формуле

$$P(t) = \frac{q}{S} \frac{d^2 X}{dt^2} \quad (2)$$

Здесь X — траектория разгона метаемого тела, измеренная с помощью электроконтактного устройства, S — площадь поперечного сечения канала камеры.

Доля сгоревшей смеси рассчитывалась по формуле

$$\Psi = \frac{q V_d^2}{2 \eta \omega Q} \quad (3)$$

Здесь Q — теплота взрыва смеси, η — коэффициент полезного действия метательного устройства, работающего в режиме НСД (его величина, согласно оценкам [1], равна 0.4–0.45).

На рис. 2 приведены результаты измерения и их обработки для опыта с зарядом массой 6.2 г, смесью плотностью 1.46 г/см³ и высотой диска 5.83 мм. Приведены: траектория разгона метаемого тела, определенная по контактными датчикам; диаграмма скорости движения метаемого тела, полученная дифференцированием траектории разгона; диаграмма давления, рассчитанная по формуле (2); экспериментальная диаграмма давления, полученная с помощью пьезокварцевого датчика давления. Хорошее согласие расчетной и опытной диаграмм давления позволяет использовать информацию, получаемую с помощью контактных датчиков, для оценки давления в камере и доли сгоревшей смеси.

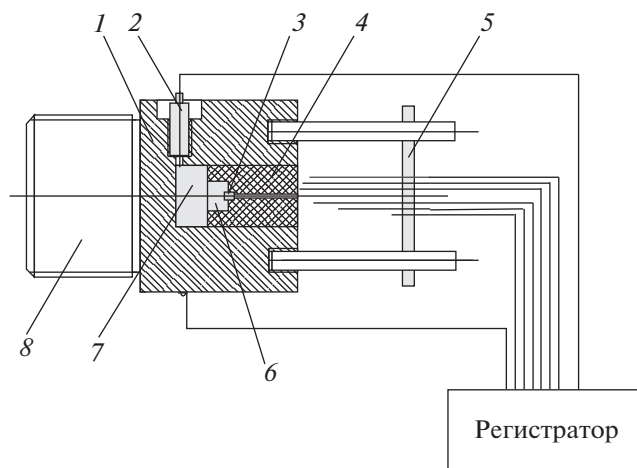


Рис. 1. Схема лабораторного импульсного устройства с отстрелом массы: 1 — камера; 2 — пьезокварцевый датчик давления; 3 — капсюль-воспламенитель; 4 — метаемое тело с полостью; 5 — электроконтактное устройство с шестью игольчатыми датчиками для регистрации разгона метаемого тела; 6 — таблетка промежуточного воспламенителя, выводящего процесс на НСД; 7 — заряд исследуемого материала в форме диска; 8 — концевик для крепления устройства к баллистическому маятнику.

По результатам всей этой серии опытов можно сделать следующие выводы. Заметное влияние на выходные характеристики устройства оказывает изменение массы метаемого тела и массы заряда. При увеличении массы заряда растут импульс тяги и дульная скорость. Максимальное давление также увеличивается, но остается ниже 1.2 ГПа. При увеличении массы метаемого тела дульная скорость, естественно, снижается, однако импульс тяги растет; максимальное давление также увеличивается, но сравнительно слабо, при этом растет время пребывания продуктов горения в камере. Увеличение плотности смеси и размера частиц перхлората аммония практически не сказывается на импульсе тяги и дульной скорости, однако максимальное давление снижается. Что касается полноты горения, то во всех опытах этой серии наблюдались сравнительно низкие значения, в среднем на уровне 40–50%, и лишь в нескольких

Таблица 1. Пример результатов измерений в импульсном устройстве с отстрелом массы для смеси перхлората аммония + 15% ПММА

Масса заряда, г	Масса метаемого тела, г	Импульс тяги, Н · с	Дульная скорость V_d/V_{56} , м/с	Максимальное давление, ГПа расчет/эксперимент	Доля сгоревшего ВВ, %
6	150	56	310/290	0.87/0.84	54
6	241	65.3	232/254	1.14/1.1	58
10	150	66	340/320	1.0/—	39
12	150	74	371	0.98/—	39

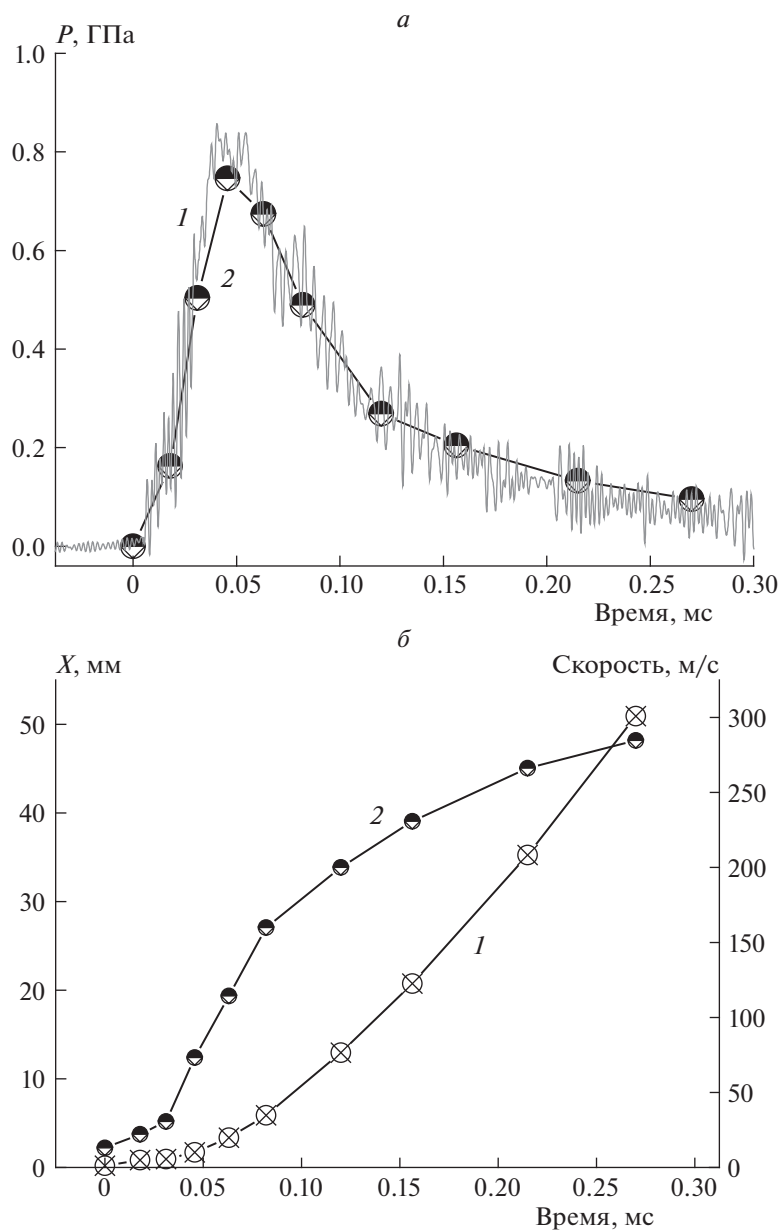


Рис. 2. Пример результатов опытов и их обработки в лабораторном импульсном устройстве с отстрелом массы: *a* – экспериментальная диаграмма давления в камере (1) и диаграмма давления, рассчитанная по траектории метаемого тела (2); *б* – траектория (1) и диаграмма скорости метаемого тела до вылета из камеры (2).

опытах с высокой массой метаемого тела полнота горения увеличилась, приблизившись к 60%.

ОПЫТЫ С УДЛИНЕННЫМИ ЗАРЯДАМИ В ПРОЧНОЙ ОБОЛОЧКЕ

Согласно имеющимся данным [2, 3], во всех опытах, которые проводились на примере смеси перхлората аммония (средний размер частиц составлял 90 мкм) с 15% ПММА с зарядами диаметром 15–50 мм и длиной 200 мм, заключенными в прочные стальные оболочки, при относительной

плотности от 0.85 и выше наблюдалась НСД, которая распространялась с постоянной по длине заряда скоростью, лежащей в диапазоне 2.5–2.05 км/с, в зависимости от плотности заряда. Детонация возбуждалась капсюлем–воспламенителем через таблетку промежуточного воспламенителя, изготовленную из мелкокристаллического гексогена, запрессованного до относительной плотности 88% и размещенного у закрытого торца заряда. Пример траектории фронта волны, зарегистрированной через ряд отверстий в оболочке для заряда относительной плотностью 0.96% и распро-

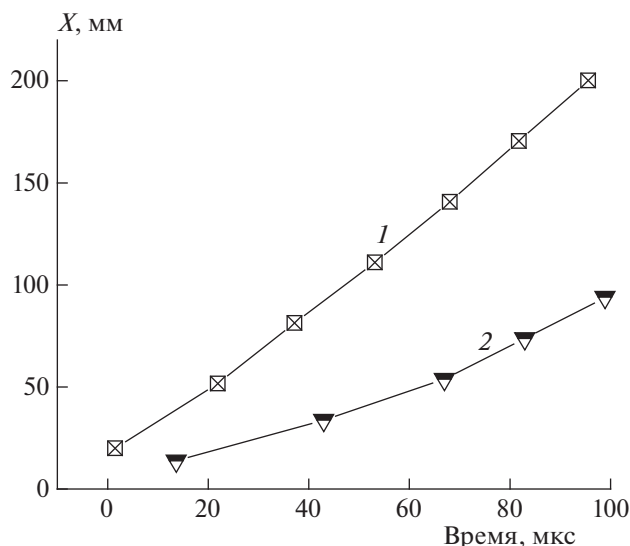


Рис. 3. Траектории фронта НСД при инициировании от закрытого торца заряда таблеткой гексогена (1) и от метаемого тела таблеткой тротил/гексоге 30/70 (2). Смесь перхлората аммония (90 мкм) с 15% ПММА относительная плотностью 0.96.

страняющейся со скоростью ~ 2.1 км/с, за исключением начального, более медленного участка, приведена на рис. 3 (кривая 1).

Давление в волне измеряли с помощью высокочастотного пьезокварцевого датчика поршневого типа, разработанного в ИХФ РАН А.И. Коротковым и А.А. Сулимовым, который позволял записывать давление до 1.3 ГПа. Пример регистрации давления при НСД в заряде исследуемой смеси плотностью 1.67 г/см³ (относительная плотность 0.96), длине заряда 110 мм, диаметре 15 мм и длине канала оболочки 250 мм приведен на рис. 4. Следует отметить острые пульсации давления с периодом 2.5–3 мкс, которые связаны, скорее всего, с работой датчика, и пакеты длительностью около 50 мкс, которые отражают циркуляцию отраженных волн вдоль заряда. Максимальная амплитуда давления была на уровне 1.1 ГПа, а последующий его спад вызван истечением продуктов детонации через открытый торец заряда.

Если на выходном конце оболочки установить сопло-диффузор (угол расширения — 20° , отношение площади выходного сечения сопла к площади канала равно 5), то можно измерить удельный импульс тяги, который в разных опытах составил от 205 до 222 с [5]. Расчетный удельный импульс смеси гораздо выше, и при давлении 0.3 ГПа он равен 310 с. Разница, как показали опыты с варьированием свойств соплового блока, связана прежде всего с неполным расширением струи продуктов (при расчете удельного импульса предполагается, что расширение происходит до атмосферного давления; в данных опытах это недостижимо).

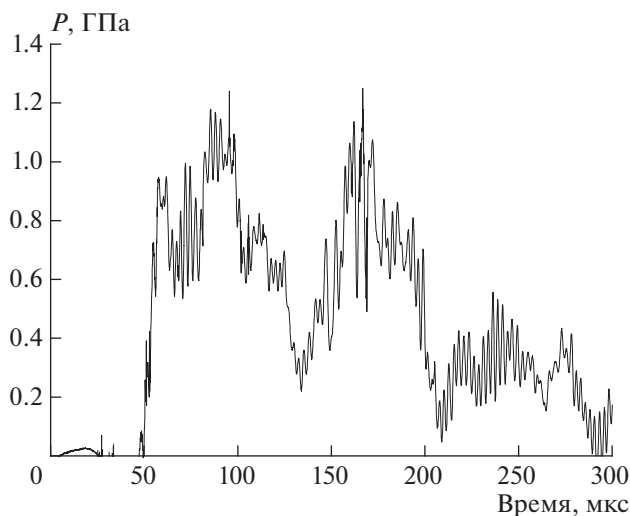


Рис. 4. Запись давления, полученная с помощью пьезоэлектрического датчика, размещенного в точке 28 мм, при НСД в заряде с относительной плотностью 0.96; смесь перхлорат аммония (90 мкм) с 15% ПММА, длина заряда — 110 мм, длина канала — 250 мм. Инициирование от закрытого торца заряда.

Оценить вклад неполноты химического превращения по этим опытам достаточно проблематично.

Были проведены опыты, в которых на открытом торце цилиндрического заряда размещали сборку из метаемого тела и набора электроконтактных датчиков, аналогичную той, что была применена в лабораторном устройстве с отстрелом массы. Оболочка имела канал диаметром 16 мм и длиной 160 мм, длина исследуемого заряда составляла 112 мм. Промежуточный воспламенитель в виде таблетки диаметром 12 мм и высотой 12 мм изготавливался прессованием смеси тротил/гексоген 30/70 и размещался в полости метаемого тела. Иницируемый процесс развивался медленнее, чем в опытах с инициированием от закрытого торца заряда. Пример траектории фронта свечения дан на рис. 3 (кривая 2). Здесь длина переходного участка составила 65 мм, скорость НСД — 1.4 км/с. На рис. 5 приведен пример записи давления, полученной с помощью высокочастотного пьезокварцевого датчика типа AVL, размещенного на расстоянии 100 мм от закрытого торца заряда. Масса метаемого тела составляла 102 г. Здесь же приведена диаграмма давления, полученная при замене исследуемого заряда инертным аналогом, при сгорании одного промежуточного заряда. Видно, что амплитуда инициирующей волны равна 0.36 ГПа. Затем после распространения волны НСД по заряду и отражения от закрытого торца заряда давление повышается до ~ 0.9 ГПа. Далее давление снижается вслед за ускорением и вылетом метаемого тела из трубы.

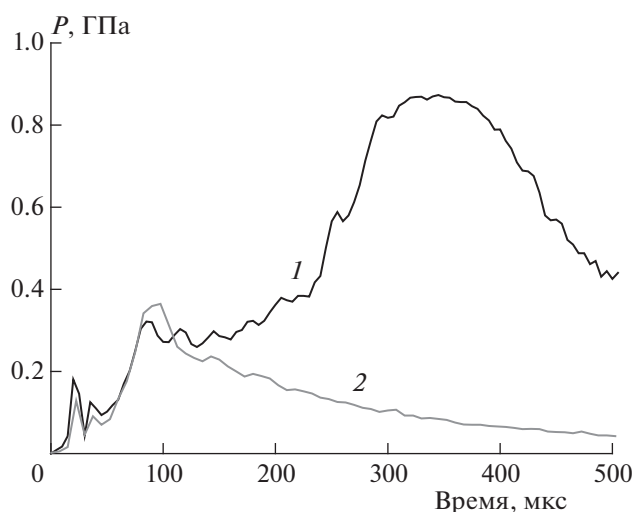


Рис. 5. Записи давления, полученные с помощью пьезоэлектрического датчика типа AVL, размещенного в 100 мм от закрытого торца заряда, при инициировании от метаемого тела: 1 — НСД в смеси перхлорат аммония (90 мкм) с 15% ПММА; относительная плотность — 0.96, длина заряда — 112 мм, длина канала — 160 мм; 2 — инертный пористый заряд вместо смеси, давление от горения промежуточного воспламенителя.

Траектория разгона метаемого тела, измеренная контактными датчиками, и диаграммы изменения скорости метаемого тела и давления, которые получены дифференцированием траектории, приведены на рис. 6. В этом опыте масса метаемого тела равна 52 г, масса заряда смеси — 31 г, величина максимального давления — 0.72 ГПа, дульная

скорость — 430 м/с. Оценка доли сгоревшей смеси по формуле (3) дала значение на уровне 25%.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Суммируя результаты экспериментальных наблюдений, можно сделать следующие выводы общего характера. Низкоскоростная детонация в зарядах длиной до 200 мм, спрессованных из смеси перхлората аммония с 15% ПММА, при относительной плотности выше 0.85 распространяется с постоянной скоростью около 2–2.2 км/с. Типичные значения максимального давления в волне лежат в диапазоне 0.8–1.2 ГПа. Стальная оболочка в ходе опыта не деформируется и может быть использована многократно. Действие торцевой волны разрежения, создаваемой при разгоне метаемого тела, не обеспечивает условий для эффективного догорания смеси за фронтом волны НСД. Полнота горения остается низкой.

Численное моделирование проводилось для того, чтобы получить более полное представление о течении реагирующей смеси при НСД и оценить условия, необходимые для повышения полноты горения. Расчеты проводились с помощью квазиодномерной модели перехода горения в детонацию [6], которая ранее успешно применялась для анализа конвективного горения и НСД в зерновых пироксилиновых порохах и дымном порохе [7]. В основе модели лежат общие положения механики двухфазных реагирующих сред. Две фазы: твердая фаза — исходный энергетический материал и газовая — продукты химиче-

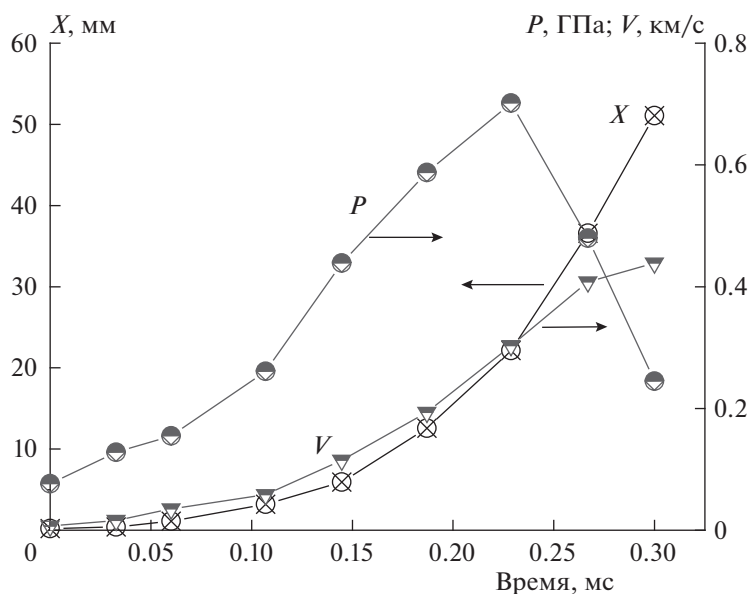


Рис. 6. Пример траектории разгона метаемого тела, измеренной электроконтактными датчиками, и рассчитанные на ее основе диаграммы скорости и давления. Опыт с инициированием у метаемого тела. Смесь перхлората аммония (90 мкм) с 15% ПММА; относительная плотность — 0.9, длина заряда — 109 мм, длина канала — 160 мм.

ского превращения, имеют каждая свою скорость движения, плотность, давление и внутреннюю энергию и подчиняются разным уравнениям состояния. Нагрев взрывчатого материала до температур, обеспечивающих начало экзотермического превращения, осуществляется за счет двух механизмов: конвективной передачи тепла от нагретых газов, фильтрующихся в поры, и вязкопластической диссипации энергии при деформации пор. После воспламенения материал горит с интенсивностью, которая вычисляется как произведение удельной поверхности частиц энергетического материала на скорость послойного горения, задаваемую как функция давления.

Приведем основные входные параметры модели, при которых осуществлялось численное моделирование НСД в смеси перхлората аммония с 15% ПММА. Основным параметром уравнения состояния твердой фазы является модуль объемного сжатия, который определяется по ударным адиабатам компонентов смеси в предположении равновесного нагружения. Его величина равна 12.8 ГПа. Двучленное уравнение состояния продуктов превращения смеси имеет следующий вид:

$$P = (\gamma - 1)\rho e + B\rho^m. \quad (4)$$

Здесь ρ и e — плотность и внутренняя энергия продуктов. Коэффициенты, входящие в уравнение (4), определялись таким образом, чтобы с их помощью достигалась наилучшая аппроксимация термодинамических расчетов параметров идеальной детонации. Эти расчеты проводились с помощью термодинамической программы [8] с варьированием начальной плотности смеси в диапазоне от 0.3 до 1.3 г/см³, которому отвечали давления детонации, ожидаемые при НСД исследуемой смеси. Получены следующие величины: показатель политропы $\gamma = 1.3$, показатель степени $m = 2.469$ и коэффициент $B = 154.84$. Теплота химического превращения $Q = 4.9$ МДж/кг. Эффективная вязкость, действующая при вязкопластической деформации твердой фазы, равна 100 Па · с. Базовое значение диаметра частиц перхлората аммония выбрано равным 150 мкм. Несколько расчетов проведено при диаметре частиц 80 мкм. Межгранулярное напряжение σ (в МПа) определяется как функция пористости заряда: $\sigma = 200(1 - \phi/0.51)^3$. Формула получена путем обработки опытов по статическому уплотнению смеси на прессе. Температура воспламенения смеси равна 700 К.

Имеющиеся в литературе экспериментальные данные [9] по скорости послойного горения дают для смесей перхлората аммония с горючими добавками зависимость от давления с показателем степени на уровне 0.5–0.6. Однако эти данные получены при давлениях не выше 10 МПа. Относительно экстраполяции к высоким давлениям

мнения ученых расходятся. Одни из них со ссылкой на работу [10], где приведены экспериментальные данные по скорости послойного горения смеси на основе перхлората аммония до давления 0.6 ГПа, рекомендуют значительно снижать показатель степени по давлению, предполагая, что при горении смесей вклад диффузионных процессов является доминирующим. Другие ученые считают, что при высоких давлениях показатель степени будет расти, так как ведущую роль будет играть горение перхлората аммония, а прослойки горючего не могут препятствовать передаче горения между его частицами.

Дополнительным аргументом в этой дискуссии могут служить оценки скоростей превращения для смесей перхлората аммония с горючим компонентом, полученные нами путем анализа экспериментальных данных по зависимости скорости неидеальной детонации от диаметра заряда. Для чистого перхлората аммония плотностью 1.0 и 1.25 г/см³ согласие результатов численного моделирования [11] и опытных данных [12, 13] получено при показателе степени по давлению, равном 1.0. Обработка аналогичных экспериментов для смесей перхлората аммония с алюминием [12] и воском [14] насыпной плотности дала величину показателя степени в диапазоне 1.0–1.1. Расчетные давления детонации составили несколько ГПа. Окончательно для расчетов в данной работе мы приняли значение показателя степени, равное 1.0, при реперной величине скорости послойного горения 0.2 м/с при давлении 1 ГПа.

Действие промежуточного воспламенителя моделировалось с помощью участка заданной длины L_i , на котором значение константы скорости послойного горения было увеличено в 7 раз. Остальные свойства были, как у основного заряда. Длина L_i подбиралась таким образом, чтобы давление от сгорания воспламенителя при использовании инертного аналога вместо основного заряда повышалось до уровня 400–500 МПа, как это имело место в соответствующих опытах (см. диаграмму 2 на рис. 5). Промежуточный воспламенитель примыкал либо к закрытому торцу заряда, либо к метаемому телу заданной массы, которое под действием давления разгонялось вплоть до вылета из канала оболочки. Расчет начинался в момент времени $t = 0$, когда часть промежуточного воспламенителя заданной длины начинала гореть.

Пример результатов расчета для заряда с относительной начальной плотностью 0.85, размером частиц перхлората аммония 150 мкм, длиной 300 мм и диаметром 16 мм приведен на рис. 7. Заряд заключен в прочную стальную оболочку, горение инициируется от закрытого торца. На начальной стадии процесс распространяется в виде волны конвективного горения. К моменту перехода к НСД фронт

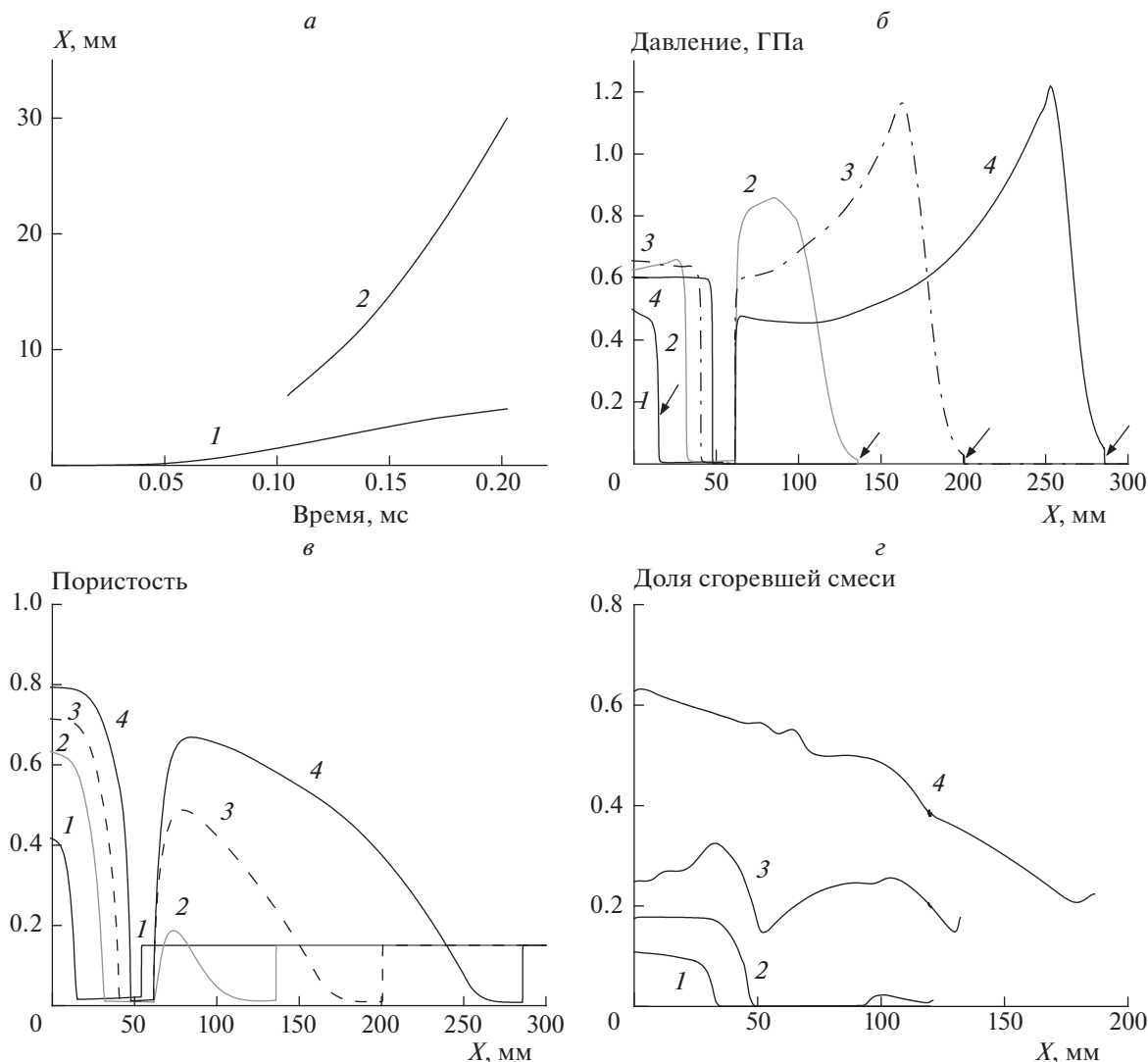


Рис. 7. Базовый вариант расчета формирования волны НСД в заряде из смеси перхлората аммония с 15% ПММА относительной плотностью 0.85 в прочной цилиндрической оболочке: *а* – траектории фронтов волны конвективного горения (1) и НСД (2); *б–г* – эволюция пространственных профилей давления, пористости и доли сгоревшей смеси в различные моменты времени: 1 – 0.1 мс, 2 – 0.145 мс, 3 – 0.17 мс, 4 – 0.2 мс. Стрелки указывают положение фронта воспламенения.

конвективного горения прошел вдоль заряда 16.5 мм, его скорость составила 380 м/с, давление – 560 МПа, массовая скорость – 220 м/с. Перед фронтом сформировалась зона уплотнения, которая представляет собой практически газонепроницаемую пробку с пористостью всего около 1.5%. Фронт НСД возникает на передней кромке зоны уплотнения при $X = 60.4$ мм. Таким образом, длина переходного участка до низкоскоростной детонации есть $L_{\text{LVD}} = 60.4$ мм. Скорость НСД, при ее начальном значении 1.8 км/с после незначительного снижения медленно растет. Если в качестве реперного расстояния, пройденного волной, взять расстояние, равное 200 мм, то по достижении этой точки (момент времени – 170.3 мкс) скорость волны НСД составит 2.7 км/с, а макси-

мальное давление и массовая скорость течения за фронтом волны приблизятся к значениям 1.2 ГПа и 440 м/с соответственно. Средняя скорость волны НСД на выбранном участке равна 2130 м/с, доля сгоревшей смеси составила 10%.

Так как при возникновении НСД отсутствует ретонационная волна, то участок между фронтом конвективного горения и фронтом НСД (начальной длиной 44 мм), заполненный сильно уплотненной смесью, остается невоспламененным. И, хотя фронт конвективного горения продолжает свое движение одновременно с распространением НСД, к моменту времени 170.3 мкс на участке длиной ~20 мм все еще остается свежая смесь.

Были проведены параметрические расчеты, в которых варьировались температура воспламене-

ния смеси, начальный размер частиц перхлората аммония и начальная плотность заряда. Получены следующие результаты. При уменьшении температуры воспламенения от 700 до 600 К на стадии конвективного горения, предшествующей возбуждению НСД, каких-либо заметных изменений не наблюдается, однако длина переходного участка, а также давление и массовая скорость при возникновении низкоскоростной детонации (соответствующие значения – 32 мм, 454 МПа и 190 м/с) заметно уменьшаются по сравнению с базовым вариантом. Скорость НСД некоторое время сохраняет начальное значение (1.6 км/с), но затем монотонно увеличивается. Если взять то же реперное расстояние, равное 200 мм, то средняя скорость волны составит 2170 м/с, а значения массовой скорости и максимального давления оказываются близкими к значениям, которые наблюдаются в базовом варианте.

Уменьшение размера частиц перхлората аммония до 80 мкм приводит к более существенным изменениям. Переход от конвективного горения к НСД в этом случае происходит быстрее и на меньших расстояниях (момент перехода – 47.6 мкс, $L_{\text{LVD}} = 20$ мм). При этом максимальное давление и массовая скорость увеличиваются до 820 МПа и 238 м/с соответственно. Низкоскоростная детонация при той же начальной скорости волны ~1.8 км/с быстро ускоряется, и даже если взять меньшее реперное расстояние, равное 150 мм, то средняя скорость волны увеличивается до 3.6 км/с, а максимальное давление – до 2.2 ГПа. К аналогичным результатам приводит увеличение значения константы скорости послойного горения смеси.

Увеличение относительной плотности заряда до 90% приводит к следующим изменениям. Для перехода от конвективного горения к НСД требуется большее расстояние ($L_{\text{LVD}} = 37.5$ мм); максимальное давление и массовая скорость в момент перехода составляют 580 МПа и 200 м/с соответственно. Начальная скорость НСД равна 1.9 км/с. С течением времени скорость волны и давление растут: при реперном расстоянии 200 мм средняя скорость волны составляет 2.54 км/с, а максимальное давление равно 1.27 ГПа.

Сопоставляя расчеты этой серии с экспериментальными данными, можно отметить следующее. Базовый набор входных параметров задачи позволил получить приемлемое согласие результатов численного моделирования и опытных данных как по условиям, при которых возникает НСД, так и по уровням скорости распространения волны и максимального давления. Вместе с тем по результатам расчетов можно сделать важное уточнение, которое состоит в том, что процесс, наблюдаемый в опытах, проводившихся в прочных неразрушающихся оболочках на зарядах ограниченной длины, скорее всего, не является

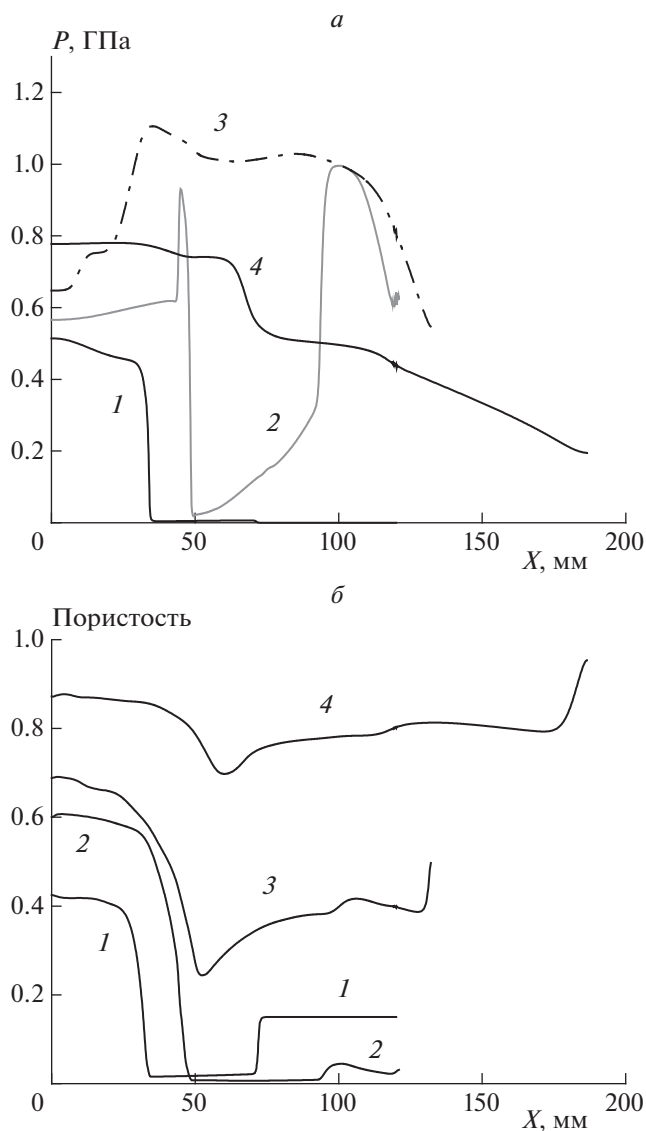


Рис. 8. Варианты расчетов для заряда длиной 120 мм из смеси перхлората аммония с 15% ПММА относительной плотностью 0.85 в прочной трубе с диаметром канала 16 мм и длиной 200 мм с метаемым телом массой 5 г при инициировании от закрытого торца; а и б – эволюция пространственных профилей давления и пористости в различные моменты времени: 1 – 0.1 мс, 2 – 0.135 мс, 3 – 0.162 мс, 4 – 0.224 мс.

стационарной НСД. В отсутствие боковых потерь при сравнительно невысокой интенсивности экзотермического превращения волна НСД ускоряется (пусть и достаточно медленно) при монотонно возрастающем давлении в волне. Аналогичная ситуация наблюдалась ранее [15] на прессованных зарядах зерновых пироксилиновых порохов, где также была получена НСД, которая распространялась в зарядах ограниченной длины с постоянной скоростью, однако величина этой скорости возрастала при увеличении мощности инициатора. В

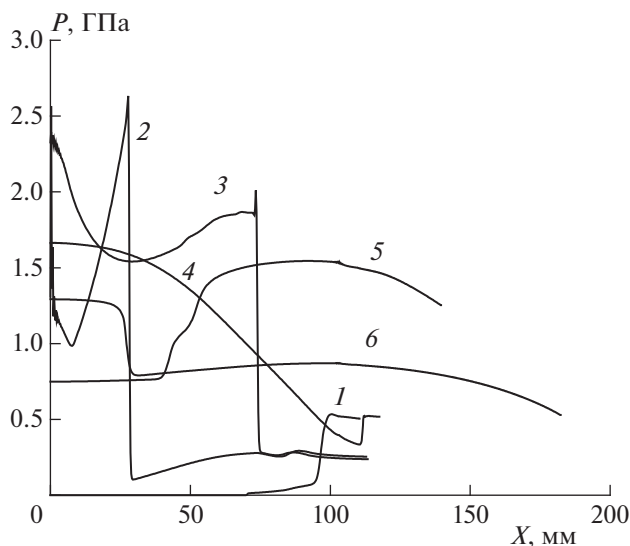


Рис. 9. Эволюция пространственных профилей давления в различные моменты времени: 1 — 0.027 мс, 2 — 0.057 мс, 3 — 0.061 мс, 4 — 0.094 мс, 5 — 0.159 мс, 6 — 0.218 мс. Вариант расчета при инициировании от метаемого тела массой 20 г для заряда длиной 120 мм из смеси перхлората аммония с 15% ПММА относительной плотностью 0.85 в прочной трубе с диаметром канала 16 мм и длиной 200 мм.

обоих случаях опыты охватывают лишь начальную фазу процесса, далекую до выхода на стационарный режим НСД, когда характеристики волн уже не зависят от условий инициирования.

Следующая серия расчетов проводилась для того, чтобы оценить возможности повышения полноты превращения при сохранении максимального давления на приемлемом уровне (1.2–1.5 ГПа) за счет торцевых волн разрежения, создаваемых с помощью метаемого тела. Пример результатов расчетов для заряда длиной 120 мм в прочной трубе с диаметром канала 16 мм и длиной 200 мм с метаемым телом массой 5 г при инициировании от закрытого торца приведен на рис. 8. Расчет проводился до момента времени, соответствующего вылету метаемого тела из трубы (в данном расчете — 235 мкс). При подходе фронта волны НСД к торцу заряда, который примыкает к метаемому телу, максимальное давление составило 650 МПа. При отражении и в ходе последующей циркуляции волн давления по заряду давление увеличилось до 1.5 ГПа и затем начало снижаться в торцевой волне разрежения. К моменту вылета метаемого тела из трубы давление максимально у закрытого торца трубы (670 МПа); давление на открытом торце трубы в этот момент равно 200 МПа, полнота горения — 45%. В другом варианте расчета, когда длина трубы была увеличена до 320 мм, момент времени вылета метаемого тела из трубы составил 311 мкс, а полнота горения достигла 84%.

При увеличении длины заряда максимальное давление на стадии циркуляции волн повышается. Так, в варианте расчета с длиной заряда в 180 мм максимальное давление превысило 2 ГПа.

На рис. 9 приведен пример результатов расчетов при инициировании от метаемого тела для заряда длиной 110 мм с диаметром канала 16 мм и длиной 150 мм с метаемым телом массой 20 г. Расчет проводился до момента вылета метаемого тела из трубы (в данном расчете — 175 мкс). Давление в волне НСД при средней скорости волны 2.2 км/с не превышало 600 МПа. Однако при отражении от закрытого торца заряда возникла пикообразная волна давления с амплитудой около 1.4 ГПа. В ходе распространения по горящему заряду амплитуда волны проходит через максимум (около 2.5 ГПа), но потом быстро снижается. После циркуляции давление выравнивается и к моменту вылета метаемого тела из трубы составляет 1–1.3 ГПа; дульная скорость равна 662 м/с, полнота горения ~60%. По сравнению с экспериментальными данными, которые были представлены выше, расчет дает заметно более высокий уровень давления и, соответственно, полноты горения. Причина, скорее всего, кроется в упрощенном рассмотрении отражения волны при выходе на торец, материал стенки которого предполагался несжимаемым.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведено экспериментальное и теоретическое исследование, результаты которого существенно дополнили информацию о свойствах НСД в смесях перхлората аммония с горючими добавками. В качестве объекта выбраны прессованные заряды из смеси перхлората аммония с 15% ПММА. Опыты проводились в лабораторном импульсном устройстве с отстрелом массы и в прочных стальных оболочках диаметром 16 мм и длиной до 300 мм с инициированием через промежуточный заряд из гексогена или смеси тротил/гексоген 30/70. Регистрировались импульс тяги, траектория разгона метаемого тела, давление, траектория фронта волны НСД. По результатам измерений вычислялись скорость метания, давление, действующее на метаемое тело, и полнота сгорания смеси. В опытах варьировали относительную плотность заряда — от 0.85 до 0.96, размер частиц перхлората аммония — от 20 до 200 мкм, длину заряда и массу метаемого тела. Эксперименты были дополнены численным моделированием. Значительное внимание уделено воздействию волн разрежения, создаваемых при движении метаемого тела, на поведение облака горящих частиц за фронтом волны.

Опыты, проведенные в импульсном устройстве с отстрелом массы, показали стабильную работу с воспроизводимыми характеристиками. При массе заряда до 12 г и массе метаемого тела

150 г давление в камере не превышало 1.2 ГПа. Однако полнота превращения смеси оказалась невысокой, почти вдвое меньшей по сравнению с взрывчатой смесью тротил/гексоген 30/70, опыты с которой в аналогичных условиях дали, по нашей оценке, полноту превращения, близкую к 100% [1].

Опыты с зарядами смеси длиной 200 мм, заключенными в прочные стальные оболочки, при инициировании у закрытого торца через промежуточный воспламенитель в целом подтвердили полученные ранее данные об устойчивом распространении НСД со скоростью около 2 км/с и о максимальном давлении, не превышающем 1.2 ГПа. Однако результаты численного моделирования показали, что анализируемый процесс еще не выходит на стационарный режим и при заданной, относительно небольшой длине заряда представляет собой начальную фазу развития НСД, в ходе которой максимальное давление в волне монотонно растет и одновременно увеличивается скорость волны. Рост последней может стать более заметным, если взять перхлорат аммония с меньшим размером частиц или увеличить длину заряда.

Действие торцевых волн разрежения анализировалось в расчетах, где к открытому торцу заряда примыкало метаемое тело. При инициировании процесса от закрытого торца заряда, после того как завершилось распространение фронта волны по заряду, одновременно с началом движения метаемого тела начинает снижаться и максимальное давление. Увеличивая длину участка, проходимого метаемым телом до вылета из трубы, удалось повысить полноту превращения смеси до значений, превышающих 80%. При увеличении длины заряда максимальное давление растет. Таким образом, при заданных свойствах смеси (размер частиц перхлората аммония и плотность заряда) существует ограничение на длину заряда, при выполнении которого максимальное давление остается на приемлемом уровне. Для повышения полноты горения можно увеличить длину участка, проходимого метаемым телом.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант

№ 16-08-00299), а также частично за счет субсидии, выделенной ИХФ РАН на выполнение государственного задания по темам 0082-2016-0011 (номер госрегистрации АААА-А17-117040610346-5), 0082-2014-0004 (ААА-А17-117040610283-3) и 0082-2018-0004 (АААА-А18-118031590088-8).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ермолаев Б.С., Сулимов А.А., Романьков А.В., Сукоян М.К. // Горение и взрыв. Вып. 7. М.: Торус Пресс, 2014. С. 206.
2. Ермолаев Б.С., Сулимов А.А. Конвективное горение и низкоскоростная детонация пористых энергетических материалов. М.: Торус Пресс, 2017. <https://doi.org/10.30826/ES2017-400>
3. Мартынюк В.Ф., Сулимов А.А., Чамров В.А., Дубовицкий В.Ф., Сукоян М.К. // Хим. физика. 1983. № 10. С. 1435.
4. Ермолаев Б.С., Сулимов А.А. // Горение и взрыв. 2017. Т. 10. № 3. С. 82.
5. Сулимов А.А., Ермолаев Б.С., Храповский В.Е., Романьков А.В. // Там же. 2018. Т. 11. № 1. С. 97.
6. Ермолаев Б.С., Беляев А.А., Сулимов А.А. // Хим. физика. 2004. Т. 23. № 1. С. 67.
7. Ермолаев Б.С., Беляев А.А., Викторов С.Б., Слепцов К.А., Жарикова С.Ю. // Хим. физика. 2010. Т. 29. № 5. С. 48.
8. Имховик Н.А., Соловьев В.С. // Вестн. МГТУ. им. Н.Э. Баумана. Серия: Машиностроение. 1994. № 3. С. 50.
9. Бахман Н.Н., Беляев А.Ф. Горение гетерогенных конденсированных систем. М.: Наука, 1967.
10. Банэм П., Голижер Ж. // Детонация и взрывчатые вещества / Под ред. Борисова А.А. М.: Мир, 1981. С. 187.
11. Ermolaev B.S., Khasainov B.A., Presles H.-N. // Euro-ruo 2007 – 34th IPS Proc. V. 1. Broune, France. 2007. P. 323.
12. Price D., Clairmont A.R., Jr., Erkman J.O. // Combust. and Flame. 1973. V. 20. P. 389.
13. Andersen W.H., Pesante R.E. // Proc. 8th Sympos. (Intern.) on Combustion. Baltimore, USA: Williams Wilkins, 1961. P. 705.
14. Апин А.Я., Воскобойников И.М., Соснова Г.С. // ЖПМТФ. 1963. № 5. С. 115.
15. Ермолаев Б.С., Мартынюк В.Ф., Беляев А.А., Сулимов А.А. // Хим. физика. 2014. Т. 33. № 6. С. 64.