

ГОРЕНИЕ, ВЗРЫВ И УДАРНЫЕ ВОЛНЫ

УДК 535.71

СМЕСЕВОЕ ТОПЛИВО В РЕЖИМЕ НИЗКОСКОРОСТНОЙ ДЕТОНАЦИИ

© 2021 г. Б. С. Ермолаев^{1*}, А. В. Романьков¹, А. А. Сулимов¹, В. Е. Храповский¹

¹Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н.Н. Семёнова
Российской академии наук, Москва, Россия

*E-mail: boris.ermolaev44@mail.ru

Поступила в редакцию 10.07.2020;
после доработки 01.10.2020;
принята в печать 20.10.2020

Представлены результаты экспериментов, проведенных в лабораторном метательном устройстве с высокоплотным зарядом, изготовленным прессованием из топливной смеси и инициируемым волной низкоскоростной детонации. По измеряемым характеристикам: импульсу тяги, диаграмме давления в камере и траектории разгона метаемого тела — определяли дульную скорость, максимальное давление в камере и полноту превращения топлива. Использовалась смесь перхлората аммония с 15% полиметилметакрилата. Несколько опытов проведено на смеси с добавкой 20% тонкоизмельченного гексогена. Варьировали плотность заряда, размер частиц перхлората аммония, массу заряда и метаемого тела. Исследуемая смесь обеспечивает устойчивую работу метательного устройства и позволяет получать воспроизводимые значения импульса тяги и скорости метания при максимальном давлении не выше 1.2 ГПа. Установлены закономерности, которые связывают определяемые характеристики со свойствами заряда. Найдены условия, при которых достигается максимальная полнота превращения, составившая в данном исследовании 75–80%. Намечены пути дальнейшего повышения полноты превращения.

Ключевые слова: низкоскоростная детонация, стехиометрическая смесь, перхлорат аммония, импульс тяги, дульная скорость.

DOI: 10.31857/S0207401X21040063

ВВЕДЕНИЕ

Режим низкоскоростной детонации (НСД) представляет интерес для быстрого контролируемого сжигания твердых энергетических материалов (ЭМ) в импульсных метательных и сопловых устройствах. Важная особенность НСД состоит в том, что на поддержание волны расходуется лишь малая часть химической энергии ЭМ. Ее основная часть в виде горящего облака диспергированной массы ЭМ аккумулируется в зоне разрежения. Для технических приложений необходимо обеспечить достаточно полное и одновременно безопасное выделение энергии этого облака.

Экспериментальные исследования полноты превращения вещества в режиме НСД проводили в лабораторной импульсной установке с отстрелом массы [1–4], которая представляет собой короткоствольное метательное устройство (длина ствола менее двух калибров). Инициирование горения осуществляли с помощью таблетки, спрессованной из смеси тротил/гексоген в соотношении 30/70, которая размещалась в донной выемке метаемого тела. Длина таблетки (12 мм) обеспечивает переход волны горения в режим НСД. Выбор устройства определялся возможностью контроли-

ровать скорость расширения продуктов НСД за счет изменения массы метаемого тела. Измеряя перемещение метаемого тела, импульс тяги и давление, определяли полноту химического превращения ЭМ, а также получали информацию об основных факторах, от которых зависят характеристики процесса и метательного устройства.

Наиболее подробно исследовали смесь тонкоизмельченных компонентов тротил/гексоген в соотношении 30/70. Опыты показали, что данное метательное устройство работает устойчиво, дает воспроизводимые характеристики по импульсу тяги и скорости метания. По результатам измерений определены условия, при которых полнота превращения приближалась к 100%, а давление в камере не выходило за пределы 1–1.2 ГПа. Камера, изготовленная из обычной стали, после опытов не имела следов деформации и применялась многократно.

Определенные надежды возлагались на смеси из перхлората аммония с органическим горючим (полиметилметакрилат, далее — ПММА), горение которых в прессованных зарядах с низкой пористостью, согласно имеющимся данным [3–6], не переходит в нормальную детонацию в широ-

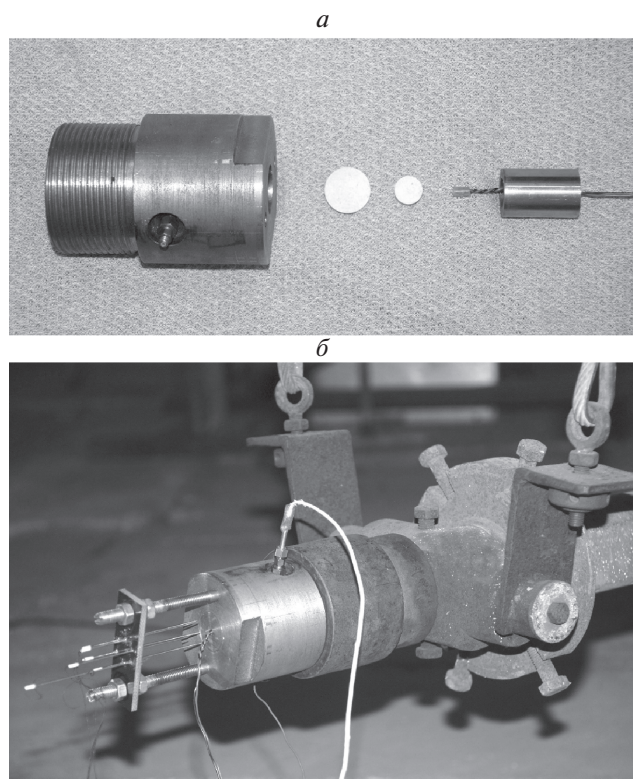


Рис. 1. Фотографии лабораторного метательного устройства, состоящего из: камеры, таблеток инициатора и ЭМ и метаемого тела перед сборкой (а) и устройства в сборе, закрепленного на маятнике (б).

ком диапазоне диаметров заряда. Однако предварительные исследования, проведенные на стехиометрической смеси перхлорат аммония—ПММА в импульсном устройстве с отстрелом массы, обнаружили заметное недогорание, явившееся следствием диффузионных процессов, замедляющих химическое превращение. Изменения плотности смеси и размера частиц перхлората аммония не привели к улучшению ситуации. В данной статье результаты исследований, проведенных на смеси из перхлората аммония с ПММА, дополнены и представлены подробно.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Фотографии лабораторного метательного устройства приведены на рис. 1. Устройство состоит из прочной стальной камеры с каналом диаметром 25,5 мм и длиной 50 мм; в канал плотно, на скользящей посадке вставляется метаемое тело — стальной цилиндр, имеющий фигурную осевую полость для таблетки инициатора с торцевой выемкой под капсуль-воспламенитель. Сборка из шести контактных датчиков, закрепленная на корпусе камеры, служит для регистрации разгона метаемого тела. В боковой стенке камеры

имеется отверстие под высокочастотный пьезокварцевый датчик давления. Применяли: датчик Т-6000 с рабочим диапазоном давлений до 0,6 ГПа и датчик разработки ИХФ РАН с диапазоном до 1—1,3 ГПа. Устройство в сборе крепилось на баллистическом маятнике (масса около 62 кг, длина подвески — 4,5 м), с помощью которого измеряли импульс тяги.

Инициатор изготавливали из смеси тротил/гексоген 30/70. Исходными компонентами служили: тротил, полученный измельчением штатного чешуйчатого продукта в вибромельнице (средний размер частиц ~20 мкм), и гексоген, полученный отсевом мелкой фракции штатного полидисперсного продукта (средний размер частиц ~35 мкм). Компоненты тщательно перемешивались: смесь навесками массой 2 г прессовали до плотности ~1,51 г/см³ в цилиндры диаметром 12 мм и длиной 12 мм.

Инициатор размещали в полости метаемого тела и поджигали быстродействующим капсюлем-воспламенителем марки НХ-ПЧ-А. Горение в инициаторе быстро ускорялось до уровня НСД и далее передавалось основному заряду. Этот заряд прессовался из стехиометрической смеси перхлората аммония с 15% ПММА до плотности 1,46—1,67 г/см³ в форме плоского диска диаметром 25 мм и длиной 5—13 мм в зависимости от массы. Средний размер частиц перхлората аммония — 20—200 мкм; самая мелкая фракция получалась измельчением технического продукта в вибромельнице, а промежуточные фракции — рассевом с помощью сит. Порошок ПММА состоял из частиц средним диаметром 4 мкм. Основной заряд размещали на дне камеры под метаемым телом. В нескольких опытах в смесь вводили полидисперсную 20%-ную добавку гексогена (средний размер частиц — 60 мкм). Помимо плотности основного заряда и размера частиц перхлората аммония, в опытах варьировали массу основного заряда (от 2 до 12 г) и массу метаемого тела (от 50 до 220 г).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

На рис. 2 приведены примеры измерений и их обработки для опыта с основным зарядом массой 4 г. Смесь приготовлена из перхлората аммония фракции 20 мкм, плотность заряда — 1,46 г/см³. Траектория разгона метаемого тела (рис. 2а) построена по шести точкам, полученным с помощью сборки контактных датчиков: игольчатый конец первого электрода размещался на расстоянии 0,2 мм от верхнего торца метаемого тела, конец шестого электрода — на расстоянии, которое соответствует вылету метаемого тела из камеры. Диаграмма скорости метаемого тела получена дифференцированием траектории разгона по времени.

Скорость, определенная по двум последним датчикам и обозначенная U_{56} , использована для оценки дульной скорости. В этом опыте ее величина составила 285 м/с.

Дифференцируя диаграмму скорости, можно оценить давление, действующее на метаемое тело, по формуле

$$P = \frac{q}{S} \frac{dU}{dt}. \quad (1)$$

Здесь q и S — масса и площадь поперечного сечения метаемого тела соответственно. Диаграмма давления, рассчитанная для данного опыта по формуле (1), приведена на рис. 2б. Здесь же приведена экспериментальная диаграмма, записанная с помощью пьезокварцевого датчика давления. Видно хорошее согласие по форме расчетной и опытной диаграмм давления, величине максимального давления (0.75–0.8 ГПа) и длительности разгона (около 0.3 мс).

Импульс тяги, измеренный в этом опыте, составил 54.5 Н · с. Величину импульса тяги можно использовать для оценки дульной скорости, применив следующую формулу:

$$G = qU_d + mgI_{sp}. \quad (2)$$

Здесь m — масса ЭМ, g — ускорение силы тяжести и I_{sp} — удельный импульс истекающих газов. Второе слагаемое связано с истечением газов после вылета метаемого тела. Его величина обычно мала по сравнению с первым слагаемым. Выбрав, согласно данным работы [3], $I_{sp} = 130$ с, получим, что для данного опыта $U_d = 305$ м/с. Эта величина неплохо согласуется с U_{56} , измеренной с помощью сборки контактных датчиков.

Для оценки полноты химического превращения можно использовать уравнение Резаля [7], на основе которого с некоторыми допустимыми упрощениями получена следующая формула:

$$\psi \approx \frac{\frac{\gamma-1}{2} q U_d^2 + P_d S L}{mf}. \quad (3)$$

Здесь γ — показатель адиабаты продуктов превращения, f — баллистическая сила ЭМ, P_d — давление в момент вылета метаемого тела, L — расстояние, пройденное метаемым телом. Чтобы применить формулу (3), нужно знать термодинамические свойства продуктов превращения смеси. С помощью программы DNITERM [8] были выполнены расчеты характеристик детонации для нескольких начальных плотностей смеси, охватывающих диапазон давлений 0.1–1.3 ГПа, типичных для данного эксперимента. Оказалось, что свойства продуктов превращения слабо меняются в указанном диапазоне давлений. Для оценки полноты превращения по формуле (3) были выбраны следующие значения: $\gamma = 1.27$ и $f = 1.16$ МДж/кг.

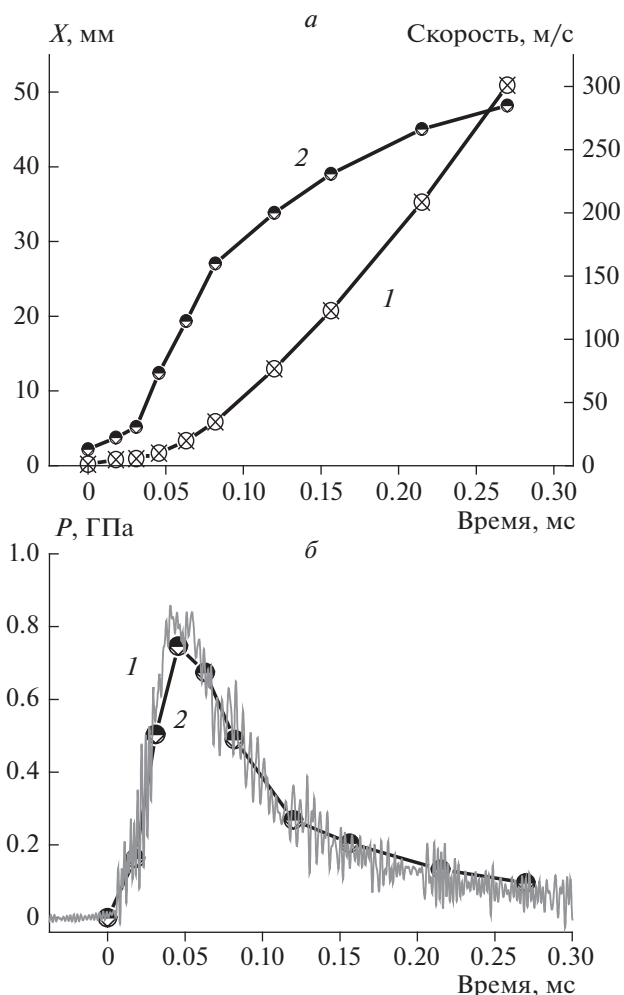


Рис. 2. Пример результатов измерений и их обработки для опыта с зарядом из смеси перхлората аммония (20 мкм) с 15% ПММА: а — траектория (1) и диаграмма скорости метаемого тела до вылета из камеры (2); б — экспериментальная диаграмма давления в камере (1) и диаграмма давления, рассчитанная по траектории метаемого тела (2).

Еще одну оценку полноты превращения можно получить, используя полуэмпирическое уравнение баланса энергии, которое для метательного устройства имеет следующий вид:

$$\eta \psi m Q = q U_d^2 / 2, \quad (4)$$

где Q — теплота превращения ЭМ.

Согласно исследованию, выполненному ранее на смеси тротил/гексоген 30/70 [3], коэффициент полезного действия η данного устройства равен 40–45%. Подставляя в формулу (4) средние величины дульной скорости $((U_d + U_{56})/2)$ и $\eta = 42\%$ и используя значения $Q = 4.2$ МДж/кг для исследуемой смеси и 4.7 МДж/кг для инициатора, получим оценку полноты превращения для данного

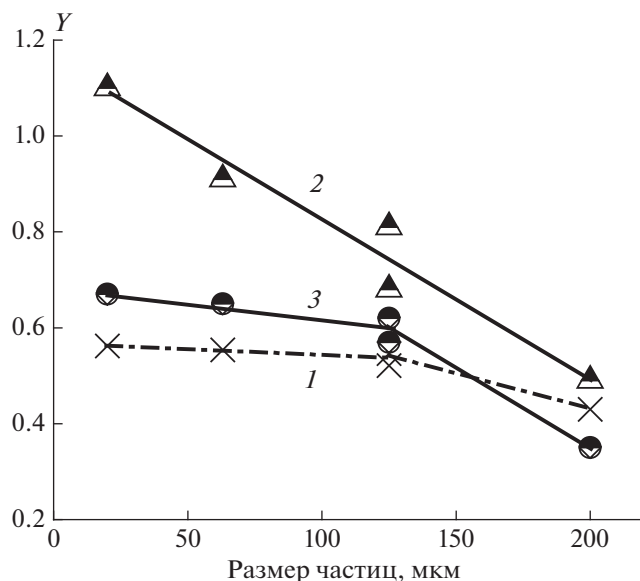


Рис. 3. Влияние среднего размера частиц перхлората аммония на результаты измерений: 1 — импульс тяги, Н·с·100; 2 — максимальное давление, ГПа; 3 — полнота превращения. Масса основного заряда 4–4.1 г, плотность заряда 1.53–1.61 г/см³, масса метаемого тела — 150 г.

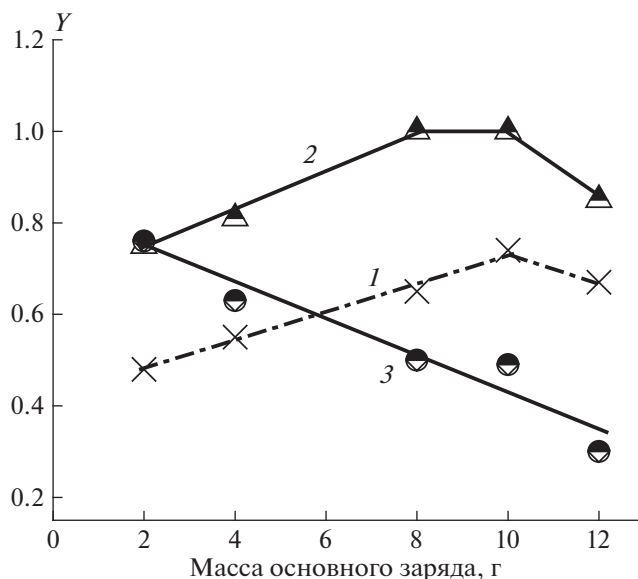


Рис. 4. Влияние массы основного заряда на результаты измерений: 1 — импульс тяги, Н·с·100; 2 — максимальное давление, ГПа; 3 — полнота превращения. Плотность заряда 1.57–1.67 г/см³, размер частиц перхлората аммония — 125 мкм, масса метаемого тела — 150 г.

опыта 60%. Очень близкую величину дает оценка по формуле (3).

Несколько слов о погрешности определения указанных характеристик. Импульс тяги измеряется с погрешностью менее 2%. Среднеквадратичное отклонение в параллельных опытах близко к этой величине. Погрешность определения дульной скорости контактными датчиками U_{56} также равна 2%. Однако среднеквадратичное отклонение составляет около 5%. Максимальное давление реализуется на начальной стадии разгона метаемого тела. Здесь расстояние между соседними датчиками составляет 1 мм и менее, поэтому погрешность определения максимального давления выше и близка к 10%. Приблизительно с той же точностью оценивается полнота химического превращения. Далее будут рассмотрены зависимости указанных характеристик (импульса тяги, максимального давления, дульной скорости и полноты превращения) от плотности и массы заряда, размера частиц перхлората аммония, добавки гексогена к смеси и массы метаемого тела.

Влияние плотности заряда исследовалось в интервале 1.46–1.67 г/см³ при массе основного заряда — 4.0–4.1 г, массе метаемого тела — 150 г и перхлорате аммония с частицами размером 125 мкм. Показано, что импульс тяги, дульная скорость и полнота превращения независимы от плотности заряда имеют практически постоянные значения 54.6 ± 0.6 Н·с, 295 м/с и 62% соответственно. Что касается максимального давления, то его величина

на монотонно снижается от 0.94 до 0.75 ГПа по мере увеличения плотности заряда.

Результаты опытов, в которых исследовалось влияние размера частиц перхлората аммония, приведены на рис. 3. Основной заряд имел массу 4.0–4.1 г, плотность заряда составила 1.53–1.61 г/см³ и масса метаемого тела — 150 г. К сожалению, измельчение перхлората аммония до среднего размера частиц 20 мкм не дало ожидаемого эффекта и привело лишь к заметному росту максимального давления до уровня 1.1 ГПа. Импульс тяги и полнота превращения оказались почти такими же, как в случае более крупных частиц с размерами 63 и 125 мкм: 53–56 Н·с и около 60% соответственно. И лишь при увеличении размера частиц до 200 мкм наблюдается резкое снижение обеих величин.

Влияние массы основного заряда представлено на рис. 4. В этой серии опытов плотность заряда составила 1.57–1.67 г/см³, размер частиц перхлората аммония — 125 мкм и масса метаемого тела — 150 г. Импульс тяги и максимальное давление монотонно растут, достигая наибольшей величины при массе заряда 10 г, затем происходит спад. Полнота превращения имеет наибольшую величину 76% при массе заряда 2 г. По мере увеличения массы заряда полнота превращения снижается.

Влияние изменения массы метаемого тела в диапазоне 100–220 г представлено на рис. 5. В этой серии опытов плотность заряда составила

1.59–1.67 г/см³, размер частиц перхлората аммония – 125 мкм и масса основного заряда – 4–4.1 г. Все характеристики: импульс тяги, максимальное давление и полнота превращения – демонстрируют линейный рост по мере увеличения массы метаемого тела. Импульс тяги в изученном диапазоне увеличился более чем в 1.5 раза. Полнота превращения увеличивается от 57 до 72%. Для максимального давления в целом также наблюдается рост, хотя сравнительно слабый.

Опыты с добавкой 20% гексогена проводили на смесях с перхлоратом аммония фракций 20 и 63 мкм. Масса метаемого тела составила 150 г, плотность заряда – 1.5–1.55 г/см³. Во всех опытах с добавкой гексогена характеристики оказались более высокими, чем в аналогичных опытах со смесями без добавки. Соответствующие примеры приведены в табл. 1. Прирост полноты превращения составил 17%.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Короткоствольное лабораторное метательное устройство, использованное в данной работе, специально разрабатывалось для изучения действия тыльной волны разрежения на облако горящих частиц ЭМ, которые образуются после прохождения по заряду фронта НСД. Основными факторами, позволяющими варьировать это действие, служат масса метаемого тела и масса заряда. Волна НСД, входящая в исследуемый заряд, формируется инициатором – таблеткой прессованной смеси тротил/гексоген в соотношении 30/70, поджигаемой быстросгорающим капсулем-воспламенителем. Эффект действия тыльной волны определяется интегрально по результатам измерений импульса тяги, траектории разгона метаемого тела и диаграммы давления в камере.

Наибольший интерес вызывают данные, полученные при увеличении массы метаемого тела. Благодаря более медленному разгону метаемого тела, импульс тяги демонстрирует заметный рост, тогда как максимальное давление увеличивается сравнительно слабо, что является позитивным результатом. Полнота превращения монотонно растет по мере увеличения массы метаемого тела. Однако достигнутый уровень в 60–70% следует

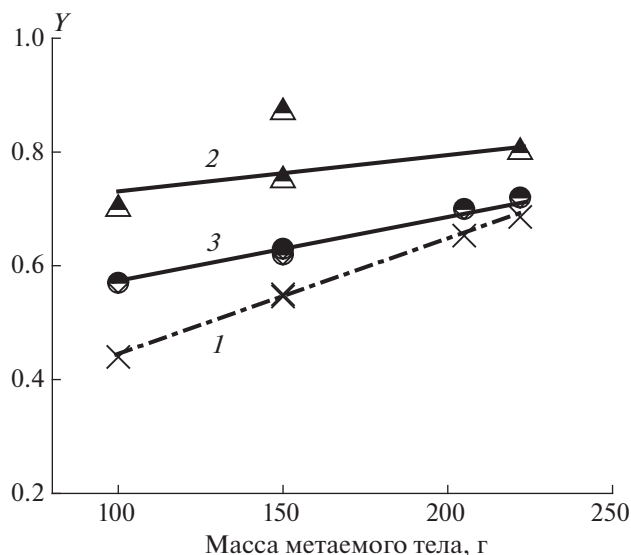


Рис. 5. Влияние массы метаемого тела на результаты измерений: 1 – импульс тяги, Н · с · 100; 2 – максимальное давление, ГПа; 3 – полнота превращения. Плотность заряда 1.59–1.67 г/см³, размер частиц перхлората аммония – 125 мкм, масса основного заряда – 4–4.1 г.

признать недостаточным. Дальнейшие опыты были направлены на то, чтобы повысить полноту превращения.

Измельчение частиц перхлората аммония рассматривалось в качестве одного из главных факторов, позволяющих воздействовать на скорость тепловыделения. При сильном эффекте можно было опасаться значительного увеличения максимального давления. Опыты с перхлоратом аммония фракции 20 мкм показали, что максимальное давление, к счастью, не вышло за допустимый предел (1.2 ГПа). Однако прирост как импульса тяги, так и полноты превращения в опытах с таким размером частиц по сравнению с фракцией 125 мкм оказались чисто символическими. Вместе с тем в опытах с крупной фракцией перхлората аммония (200 мкм) все характеристики выстрела значительно снизились.

Изменение начальной плотности заряда практически не оказывает влияния на импульс тяги,

Таблица 1. Сравнение характеристик в опытах с зарядами базовой смеси (А) и смеси с добавкой 20% гексогена (Б)

Смесь	Плотность смеси, кг/м ³	Масса основного заряда, г	Импульс тяги, Н · с	Максимальное давление, ГПа	Дульная скорость, м/с	Полнота превращения, %
А	1.54	8	66.2	0.94	342	50
Б	1.56	8	76.1	1.08	407	67
А	1.5	4	55.4	0.91	308	64
Б	1.5	4	62.9	1.0	356	81

дульную скорость или полноту превращения. Преимуществом плотных зарядов (плотность — 1.6–1.67 г/см³, пористость — 5–9%) является более низкая величина максимального давления.

Более сильный эффект наблюдается при увеличении массы заряда. Импульс тяги и максимальное давление монотонно растут, достигая наибольшей величины при массе заряда 10 г, затем происходит спад. Причины, вызывающие спад максимального давления, не совсем ясны. Спад импульса тяги, возможно, связан с тем, что при увеличении массы заряда, благодаря его длине, пропорционально уменьшается длина разгона метаемого тела. Полнота превращения имеет максимальную величину 76% при массе заряда 2 г и затем монотонно снижается по мере увеличения массы заряда.

Добавка 20% гексогена к смеси дала ощутимую прибавку в полноте превращения, которая впервые в данном исследовании достигла 80%. Ранее в аналогичных условиях выстрела (масса основного заряда — 4 г, масса метаемого тела — 150 г) была получена полнота превращения 80–84% на смеси тротил/гексоген 30/70 [2]. Естественно, добавка гексогена вызвала рост максимального давления. Однако эффект оказался небольшим, и максимальное давление осталось в приемлемом диапазоне (ниже 1.1 ГПа).

Дальнейшее повышение полноты превращения требует новых исследований. Перспективы связаны с увеличением массы метаемого тела и длины камеры.

ВЫВОДЫ

Определены закономерности, которые связывают импульс тяги, максимальное давление и полноту превращения со свойствами заряда (начальная плотность, масса и размер частиц перхлората аммония) и массой метаемого тела. Найдены условия, при которых достигается наибольшая полнота сгорания смеси, составившая в данном исследовании 75–80% при максимальном давлении не выше 1.2 ГПа.

Увеличение массы метаемого тела до 220 г приводит к росту полноты превращения до 60–70%.

Измельчение частиц перхлората аммония от 125 до 20 мкм не дало заметного прироста импульса тяги и полноты превращения при сохранении максимального давления в допустимом пределе (1.2 ГПа). Вместе с тем в опытах с крупной фракцией перхлората аммония (200 мкм) все характеристики выстрела значительно ниже.

При увеличении массы заряда импульс тяги и максимальное давление монотонно растут, достигая наибольшей величины при массе заряда 10 г, затем происходит спад. Полнота сгорания заряда имеет максимальную величину 76% при массе заряда 2 г.

Добавка 20% гексогена к смеси позволила увеличить полноту превращения до 80% при максимальном давлении в приемлемом диапазоне (ниже 1.1 ГПа).

Намечены пути дальнейшего повышения полноты превращения.

Работа выполнена за счет субсидии, выделенной Федеральному исследовательскому центру химической физики им. Н.Н. Семёнова РАН на выполнение государственного задания по теме 49.230082-2018-0004 (регистрационный номер ААААА18-1180331590088-8).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ермолаев Б.С., Сулимов А.А., Романьков А.В., Сукоян М.К. // Горение и взрыв. Вып. 7 / Под ред. Фролова С.М. М.: Торус Пресс, 2014. С. 369.
2. Ермолаев Б.С., Романьков А.В., Сулимов А.А. // Горение и взрыв. 2017. Т. 10. № 4. С. 77.
3. Ермолаев Б.С., Сулимов А.А. Конвективное горение и низкоскоростная детонация пористых энергетических материалов. М.: Торус пресс, 2017.
4. Храповский В.Е., Ермолаев Б.С., Сулимов А.А. // Хим. физика. 2021. Т. 40. № 1. С. 37.
5. Ермолаев Б.С., Беляев А.А., Романьков А.В. и др. // Хим. физика. 2019. Т. 38. № 8. С. 80.
6. Комиссаров П.В., Сулимов А.А., Ермолаев Б.С. и др. // Хим. физика. 2020. Т. 39. № 8. С. 21.
7. Серебряков М.Е. Внутренняя баллистика. 2-е испр. изд. М.: Оборонгиз, 1949.
8. Имховик Н.А., Соловьев В.С. // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 1994. № 3. С. 50.