

ИМПУЛЬСНОЕ УСТРОЙСТВО С ОТСТРЕЛОМ МАССЫ, РАБОТАЮЩЕЕ В РЕЖИМЕ НИЗКОСКОРОСТНОЙ ДЕТОНАЦИИ

Б. С. Ермолаев, А. А. Сулимов, А. В. Романьков, М. К. Сукоян

ИХФ РАН
г. Москва, Россия

Низкоскоростная детонация (НСД) взрывчатых веществ (ВВ), благодаря ряду уникальных свойств, имеет неплохую перспективу применения в качестве рабочего процесса в импульсных устройствах коррекции, активной защиты и газогенераторах высокой мощности. Умеренное давление в волне, которое при определенных усилиях можно ограничить на уровне ~ 1 ГПа, позволяет изготавливать неразрушающиеся многократные устройства с временем работы менее 1 мс, включая срабатывание инициатора. Одной из проблем применения НСД является обеспечение полноты химического превращения. В пределах зоны реакции волны НСД выделяется лишь малая часть химической энергии ВВ. Глубина превращения определяется процессами, протекающими в зоне разрежения; эти процессы до сих пор практически не исследовались.

В данной работе изучено взрывное превращение ВВ в режиме НСД в импульсном устройстве с отстрелом массы, которое фактически представляет собой короткоствольное метательное устройство. Изменяя массу метаемого тела, можно контролировать скорость расширения продуктов детонации; измеряя импульс тяги и давление, можно определить полноту химического превращения. Устройство состоит из прочного стального стакана диаметром 25,5 мм и длиной, которая изменялась от 20 до 50 мм; в стакан плотно вставляется стальной цилиндр, имеющий осевую полость диаметром 15 мм и длиной 8 мм. Заряд ВВ изготавливали прессованием из смеси тротил/гексоген (ТГ) 30/70 (средний размер частиц тротила 20 мкм, гексогена — 60 мкм), обычно в форме двух таблеток. Одна таблетка массой 2 г, диаметром 15 мм и плотностью $\sim 1,51$ г/см³ размещалась в полости метаемого тела. Для заряда массой более 2 г использовалась вторая таблетка, которая имела диаметр 25 мм и плотность 1,56–1,63 г/см³ и размещалась на дне стакана. Взрывной процесс инициировался быстродействующим капсюлем марки НХ-ПЧ-А через осевое отверстие в метаемом теле. Сборка из 6 контактных датчиков, закрепленная на стакане, служила для регистрации разгона метаемого тела. В боковой стенке стакана имелось отверстие для размещения пьезоэлектрического датчика давления, работающего в диа-

пазоне до 10 000 атм. Устройство крепилось на баллистическом маятнике (масса около 62 кг, длина подвески 6 м), с помощью которого измерялся импульс тяги. Масса заряда изменялась от 2 до 24 г, а масса метаемого тела — от 50 до 400 г. Согласно данным авторов, полученным на цилиндрических зарядах ТГ в стальных трубках, процесс горения после инициирования капсулем-воспламенителем быстро ускоряется и переходит в НСД. Длина переходного участка — менее 20 мм, скорость волны — 1,5–1,8 км/с. Авторы полагают, что именно такой процесс реализуется в данном устройстве.

Результаты измерений тяги, траектории разгона тела и давления, а также примеры их обработки даны на рис. 1–3. Чтобы извлечь информацию о полноте превращения, требуется провести дополнительный анализ. Метательная способность ВВ определяется его теплотой взрыва $A = \eta Q$. Величина коэффициента полезного действия (КПД) η известна из опытов по торцевому метанию пластины при детонации ВВ [1]. Для ТГ 36/64 приводятся следующие данные: на разгон оболочки идет 63% теплоты взрыва (коэффициент η), 13,7% приходится на кинетическую энергию продуктов детонации, 21,3% энергии составляет внутренняя энергия продуктов детонации и по 1% составляют пластическая деформация оболочки и ударная волна в воздухе. В случае НСД величина η , скорее всего, должна быть на том же уровне 60%–65%: кинетическая энергия продуктов детонации и потери на пластическую деформацию и воздушную ударную волну снижаются; однако внутренняя энергия при равном расширении возрастает из-за более низких значений показателя политропы.

Рассмотрим тягу, создаваемую при взрыве заряда ВВ массой m , который закрыт метаемым телом массой M . Если скорость метаемого тела при вылете из установки равна U , то $\eta m Q = MU^2/2$ или $U = \sqrt{2\eta Q(m/M)}$. Импульс тяги, регистрируемый маятником, равен $G = MU + mgI_{sp}$. Здесь второе слагаемое дает поправку, связанную с истечением газов после вылета метаемого тела, g — ускорение силы тяжести. Эту формулу можно использовать для определения U , если известна величина I_{sp} . Возьмем стандартный удельный импульс, получаемый путем термодинамического расчета (222 с для данного ВВ). Реально величина I_{sp} меньше за счет двух эффектов:

- (1) температура газов, истекающих из камеры, гораздо ниже, чем температура горения, используемая в стандартном расчете, из-за предварительного расширения в ходе движения метаемого тела в стакане;
- (2) из-за недорасширения струи, истекающей из стакана, тяга снижается по сравнению с соплом Лавала.

Учет обоих эффектов дает для $I_{sp} \sim 130$ с. Эта оценка использовалась при расчете скорости метания по измеренной величине импульса тяги.

На рис. 1 приведены зависимости импульса тяги от фактора \sqrt{mM} и скорости метания от фактора $\sqrt{m/M}$. Видно, что на графике импульса тяги

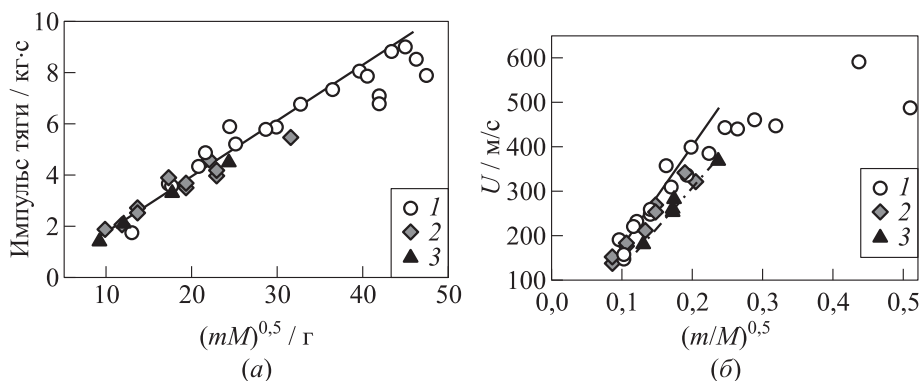


Рис. 1 Зависимость измеренного импульса тяги от \sqrt{mM} (а) и скорости метания от $\sqrt{m/M}$ (б) при разных длинах камеры: 1 — $L = 50$ мм; 2 — 30; 3 — $L = 20$ мм

(см. рис. 1, а), в согласии с формулой, бóльшая часть точек строго группируется вдоль прямой линии, независимо от длины камеры L . Отклонения имеют место для опытов (точки в правом верхнем углу графика), проведенных с массой заряда более 8 г. На графике скорости метания (см. рис. 1, б) наблюдается аналогичная картина с тем отличием, что точки при разных длинах камеры группируются вдоль отдельных прямых. По наклону прямой при $L = 50$ мм можно оценить величину КПД η , которая оказалась равной $\sim 0,45$. Это меньше, чем приведенная ранее оценка ($\eta = 0,6-0,65$), что может быть следствием либо в целом более низкого КПД метания в режиме НСД по сравнению с нормальной детонацией, либо неполноты химического превращения (на уровне 20%–25%).

Еще одну оценку полноты химического превращения можно получить обработкой сигналов контактных датчиков. Траектория разгона метаемого тела, построенная по показаниям контактных датчиков в одном из опытов, приведена на рис. 2, а. Обработка сводится к двойному дифференцированию траектории и расчету давления с помощью уравнения движения

$$P = \frac{M}{S} \frac{d^2 X}{dt^2},$$

где S — площадь поперечного сечения метаемого тела. Зная давление, скорость метаемого тела и его координату в заданный момент времени, можно рассчитать долю сгоревшего ВВ, воспользовавшись уравнением Резаля [2]:

$$\Psi = \frac{P[(W_0 - m/\rho_0) + SX] + (\gamma - 1)MU^2/2}{m[f + P(\alpha - 1/\rho_0)]}.$$

Здесь f , α и γ — сила, коволюм и показатель политропы продуктов детонации; ρ_0 — плотность ВВ; W_0 — начальный объем, занятый зарядом ВВ. Диа-

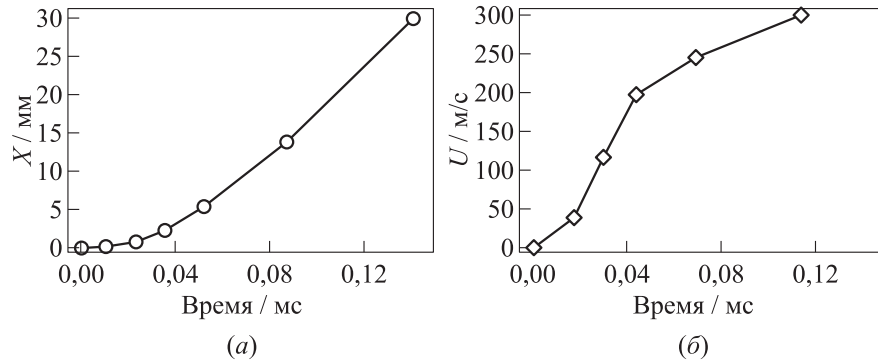


Рис. 2 Траектория (а) и скорость (б) разгона метаемого тела, определенная с помощью контактных датчиков. Опыт с $t = 2$ г, $M = 50$ г и $L = 50$ мм

грамма, показывающая скорость разгона метаемого тела, дана на рис. 2, б. Скорость, набранная к концу разгона, находится в согласии с величиной скорости метания, полученной по импульсу тяги. Оба способа измерения скорости метания имеют погрешность не выше 5%.

На рис. 3, а расчетное давление сопоставлено с кривой давления, записанной пьезодатчиком. Имеется хорошее согласие как по величине максимального давления ($\sim 0,6$ ГПа), так и на участке спада давления. Доля сгоревшего ВВ в конце расчетного участка составила $\sim 60\%$ (рис. 3, б) и, вероятнее всего, не увеличится заметно к моменту вылета метаемого тела. Увеличение массы заряда при постоянной массе метаемого тела приводит к снижению полноты горения, что, скорее всего, является причиной отклонения точек на рис. 1, полученных при массе заряда от 8 до 24 г. Увеличение

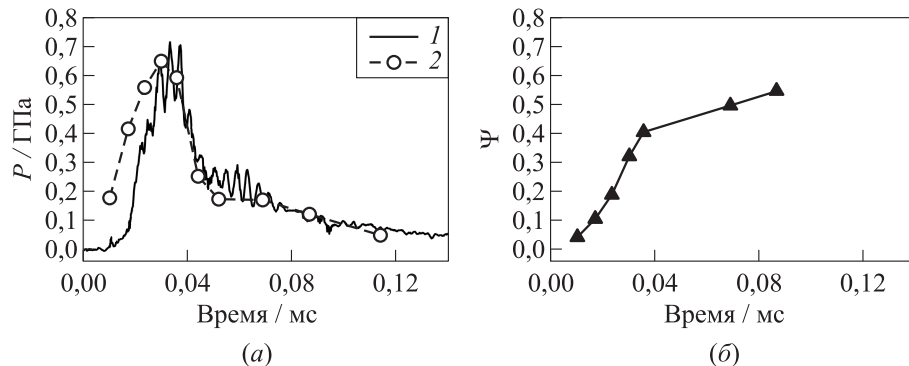


Рис. 3 Экспериментальная (1) и расчетная (2) диаграммы давления (а) и расчетная доля сгоревшего ВВ (б). Опыт с $t = 2$ г, $M = 50$ г и $L = 50$ мм

массы тела приводит к росту максимального давления и росту полноты горения. Полное сгорание ВВ, согласно оценкам, достигнуто при $m = 4$ г и $M = 150$ г и более, максимальное расчетное давление составило 1–1,3 ГПа.

Итак, для импульсного устройства диаметром 25,5 мм с отстрелом массы, которое работает на зарядах ТГ в режиме НСД, измерены импульс тяги, характеристики разгона метаемого тела и давление в камере. Импульс тяги изменяется пропорционально корню квадратному из произведения массы заряда на массу тела, по крайней мере, для зарядов не слишком большой массы. Определены условия, при которых достигается полнота химического превращения, при этом максимальное давление в камере остается не выше 1,3 ГПа. Для практики может представлять интерес импульс тяги, отнесенный к единице объема камеры. Наибольшая величина этого параметра, полученная в представленных опытах, составила $0,35 \text{ кг}\cdot\text{с}/\text{см}^3$.

Литература

1. Баум Ф. А., Станюкович К. П., Шехтер Б. И. Физика взрыва. — Физматгиз, 1959. 801 с.
2. Серебряков М. Е. Внутренняя баллистика. — Оборонгиз, 1949. 690 с.

О ПЕРЕХОДЕ ГОРЕНИЯ В ДЕТОНАЦИЮ В МЕЛКОДИСПЕРСНЫХ СМЕСЯХ ПЕРХЛОРАТА АММОНИЯ С АЛЮМИНИЕМ

В. Г. Худавердиев, А. А. Сулимов, В. Е. Храповский

ИХФ РАН
г. Москва, Россия

В настоящее время наблюдается тенденция к использованию мелкодисперсных окислителей и металлических горючих в твердых ракетных и пиротехнических топливах для улучшения их характеристик, в частности для увеличения скорости горения.

В работе представлены результаты экспериментального исследования развития взрыва в двойных мелкодисперсных смесях перхлората аммония (ПХА) с алюминием. Применяли ПХА с размером частиц 20 мкм и субмикронный алюминий марки ALEX-L с размером частиц 0,2 мкм. Опыты проводились в малопрочных оболочках из кварцевого стекла внутренним диаметром 10 мм и толщиной стенки 2 мм, прочность оболочек 250 кг/см². Исходные порошки ПХА и алюминия тщательно перемешивались вручную. Оболочка с закрытым нижним торцом крепилась к стальной пластине и располагалась вертикально. Исследуемая смесь высыпалась через верхний открытый торец оболочки последовательными порциями так, чтобы высота каждой порции составляла 2–3 диаметра заряда, после чего проводили утряску. Заряды имели близкую пористость, которая составляла около 50%, при этом плотность заряда равнялась 0,85–1,05 г/см³ в зависимости от состава смеси. Длина заряда в большинстве опытов равнялась 200 мм. Поджигание смеси проводили с помощью нихромовой спирали накаливания, располагаемой на расстоянии 2 мм от закрытого торца.

Проводили шелевую скоростную фоторегистрацию распространения процесса с помощью ждущего фоторегистра ЖФР-2. Из полученных фоторегистрограмм $X(t)$ определяли протяженность участков перехода горения в низкоскоростную детонацию (НСД) и нормальную высокоскоростную детонацию (НД), а также скорость распространения детонации на каждом из участков. Погрешность измерения скорости детонации зависела от угла наклона следового отпечатка на фотозаписи и находилась на уровне 2%–3%. Значения расстояний $L_{нсд}$ и $L_{нд}$ отсчитывали от воспламенительной спирали. Эти опыты позволяли также определять сценарий перехода горения в детонацию (ПГД).

В опытах изменялось соотношение компонентов, использовали смеси с содержанием алюминия 3, 5, 10, 28 и 54 %(вес.).

На рисунке представлены примеры характерных фоторегистрограмм развития взрывного процесса в смесях с содержанием алюминия 28 (а), 10 (б) и 5 %(вес.) (в).

Отметим основные полученные результаты.

Показано, что в малопрочных стеклянных оболочках даже при использовании слабого воспламенительного импульса — спирали накаливания — возникающее конвективное горение (КГ) переходит в НД.

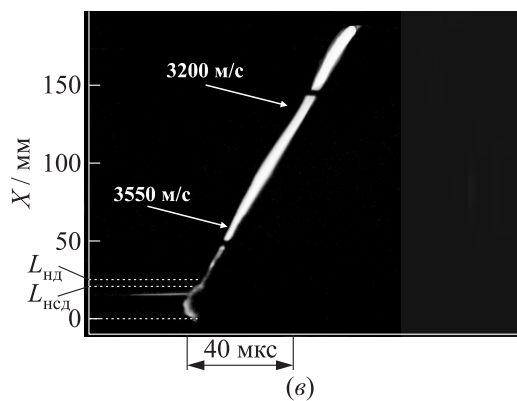
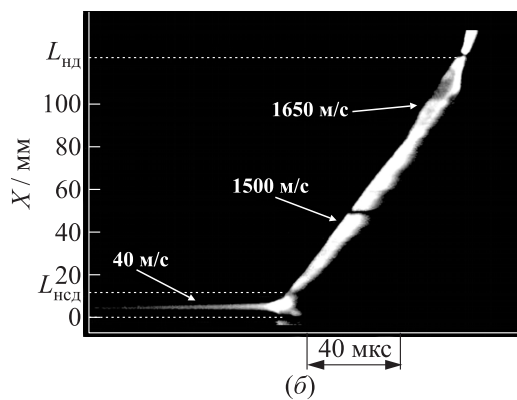
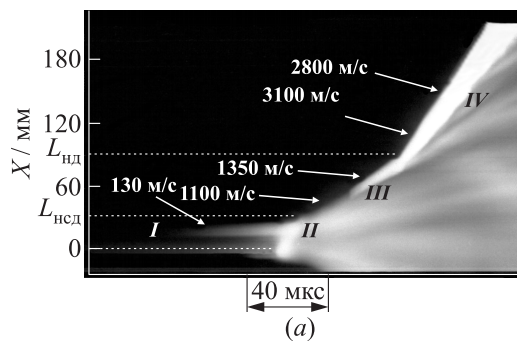
В исследованных смесях сценарий ПГД аналогичен наблюдаемому в индивидуальных взрывчатых веществ (ВВ) [1] и включает: КГ, НСД, переходящую в НД.

Зона свечения возникающего КГ состоит обычно из нескольких горизонтальных полос, заканчивающихся ярко светящимися очагами. Слияние очагов приводит к формированию вторичной волны, обеспечивающей переход КГ в НСД [2].

Для смесей с содержанием алюминия от 5 до 28 %(вес.) НСД возникает на очень малом расстоянии от спирали ($L_{НСД} = 5-30$ мм). Для смеси 5/95 и в части опытов 10/90 возникшая НСД, пройдя небольшой путь (около 5 мм), переходила в НД с установившейся скоростью 3200 м/с. В другой части опытов со смесью 10/90, а также со стехиометрической смесью 28/72 переход в НД осуществлялся через достаточно протяженную стадию НСД ($L_{НД} = 90-120$ мм), имеющей возрастающую по длине заряда скорость $D_{НСД} = 1100-1700$ м/с. Подчеркнем, что практически во всех опытах со смесями, содержащими от 5 до 28 %(вес.) алюминия, взрывной процесс заканчивался НД. Ранее на мелкодисперсных смесях ПХА с полистиролом в толстостенных плексигласовых оболочках конечной стадией ПГД была только НСД [2]. Следует отметить, что в ряде опытов на начальном участке скорость возникающей НД превышала ее установившееся значение, т. е. ПГД осуществлялся через стадию пересжатой детонации (см. (а) и (в) на рисунке), что также отмечалось в [3] для смесей на основе перхлората калия. Необходимо отметить, что в целом НД распространялась с постоянной в среднем скоростью на значительные длины заряда, равные 10 и более диаметрам заряда. В части опытов наблюдались участки с отличной от средней скоростью детонации.

В смесях 3/97 и 54/46 процесс из-за разрушения трубки обрывался на стадии КГ, при этом его скорость не превышала 300 м/с.

Отметим очень сильное влияние на ПГД небольших добавок алюминия: при 3 %(вес.) — обрыв процесса на самой ранней стадии КГ, при 5 %(вес.) — переход в нормальную детонацию с наименьшим в приведенных опытах преддетонационным участком ($L_{НД} = 20-30$ мм). Таким образом, бедные смеси из мелкодисперсных порошков ПХА с субмикронным алюминием крайне легко переходят в детонацию и приближаются по своей чувстви-



Щелевые фоторегистрограммы ПГД: *I* — конвективное горение; *II* — область формирования вторичной волны; *III* — НСД; *IV* — НД; $L_{нсд}$, $L_{нд}$ — участки перехода в НСД и НД соответственно; темные промежутки на фотозаписи соответствуют реперным линиям; (а) стехиометрическая смесь 28/72, опыт № 303; $L_{нсд} = 30$ мм, $L_{нд} = 95$ мм; (б) смесь 10/90, опыт № 301, $L_{нсд} = 12$ мм, $L_{нд} = 120$ мм; (в) смесь 5/95, опыт № 308, $L_{нсд} \approx 20$ мм, $L_{нд} \approx 25$ мм

тельности к ПГД к инициирующим ВВ типа стифната свинца, для которого $L_{нд} \approx 10$ мм [4].

Переход в детонацию происходит по механизму, который связан с возникновением в зоне КГ за первичным фронтом пламени вторичной волны экзотермической реакции и давления (см. рисунок). Эта волна возникала вблизи закрытого торца в виде яркосветящейся серповидной области, рождающей две волны: прямую, инициирующую НСД, и обратную, движущуюся к спирали.

Вопрос о механизме и закономерностях ПГД с вторичной волной давления в мелкодисперсных ВВ и смесях обстоятельно анализировался в работах [5, 6]. Здесь же были изложены соображения относительно возможных механизмов возникновения вторичной волны давления. Вместе с тем, в настоящее время полная ясность по данному вопросу отсутствует.

Были проведены опыты, в которых алюминий ALEX-L был заменен на существенно более крупный АСД-4 с размером частиц около 4 мкм, размер частиц ПХА сохранялся на прежнем уровне (20 мкм). Установлено, что в стеклянных оболочках процесс не переходил в НСД и обрывался на стадии КГ. Такой переход удалось получить только в прочных оболочках из стали-плексигласа в конструкции, описанной в [5], при этом отмечались значительные преддетонационные участки перехода. Так, для смеси 5/95 $L_{нсд} = 150$ мм, $D_{нсд} = 1900$ м/с, а для смеси 10/90 — $L_{нсд} = 170$ мм, $D_{нсд} = 1300$ м/с, при этом переход в НД в данных условиях отсутствовал [6].

Таким образом, впервые на примере смеси мелкодисперсного ПХА с субмикронным алюминием показана возможность перехода КГ в низкоскоростную и высокоскоростную детонацию в малопрочных стеклянных оболочках при поджигании спиралью накалывания.

Определены сценарий и характеристики ПГД. Для смесей с содержанием алюминия от 5 до 28 % (вес.) алюминия НСД со скоростью 1100–1700 м/с возникает на очень малом расстоянии от спирали ($L_{нсд} = 5$ –30 мм). Характер дальнейшего развития НСД до высокоскоростной детонации зависит от соотношения компонентов. Наименьший преддетонационный участок перехода горения в НД ($L_{нд} = 20$ –30 мм) демонстрируют бедные смеси с содержанием алюминия около 5 % (вес.). Переход в детонацию происходит по механизму, который связан с формированием в зоне КГ за первичным фронтом пламени вторичной волны давления.

Показана важная сенсibiliзирующая роль в процессе ПГД субмикронного алюминия, который существенно интенсифицирует горение смесей и облегчает ПГД. Эффективное влияние субмикронного алюминия проявляется не только на смесях с ПХА, но также и на смесях с другим окислителем — нитратом аммония, в которых обычно ПГД крайне затруднен. Так, удалось получить переход КГ в НСД со скоростью 800 м/с в толстостенной плексигласовой оболочке, при этом участок перехода не превышал 100 мм [7].

Литература

1. Беляев А. Ф., Боболев В. К., Коротков А. И., Сулимов А. А., Чуйко С. В. Переход горения конденсированных систем во взрыв. — М.: Наука, 1973. 293 с.
2. Беликов Е. П., Храповский В. Е., Ермолаев Б. С., Сулимов А. А. Особенности развития взрыва в порошкообразной модельной смеси перхлората аммония – полистирол // ФГВ, 1990. Т. 26. № 4. С. 101–105.
3. Долгобородов А. Ю., Сафронов Н. Е., Тесёлкин В. А., Стрелецкий А. Н. Переход горения в детонацию и чувствительность механоактивированных смесей алюминия с перхлоратом калия // Горение и взрыв / Под общ. ред. С. М. Фролова. — М.: ТОРУС ПРЕСС, 2013. Вып. 6. С. 302–306.
4. Афонина Л. В., Бабайцев И. В., Кондриков Б. Н. Метод оценки склонности ВВ к переходу горения в детонацию // Взрывное дело. — М.: Недра, 1970. Сб. 68/25. С. 149–158.
5. Храповский В. Е., Сулимов А. А., Ермолаев Б. С. Переход горения в детонацию в пористых энергетических материалах, связанный с формированием вторичной волны давления // Хим. физика, 1997. Т. 16. № 11. С. 99–113.
6. Храповский В. Е., Худавердиев В. Г. Возникновение и развитие конвективного горения в высокопористых зарядах перхлората аммония и его смесях с алюминием // Хим. физика, 2010. Т. 29. № 1. С. 39–48.
7. Храповский В. Е., Худавердиев В. Г., Сулимов А. А. Конвективное горение и переход во взрыв в смесях аммиачной селитры с алюминием // Горение и взрыв / Под общ. ред. С. М. Фролова. — М.: ТОРУС ПРЕСС, 2013. Вып. 6. С. 211–213.

ДЕТОНАЦИЯ ВЗРЫВНОГО ПРОППАНТА — ГЕКСОГЕНСОДЕРЖАЩЕГО ВОДОНАСЫЩЕННОГО ПЕСКА

А. А. Сулимов¹, Б. С. Ермолаев¹, С. Б. Турунтаев²,
А. А. Борисов¹, М. К. Сукоян¹

¹ИХФ РАН

г. Москва, Россия

²ИДГ РАН

г. Москва, Россия

Использование взрывчатых материалов в технологии нефтедобычи, в частности при гидроразрыве нефтеносного пласта, является одним из современных применений результатов, полученных в области физики взрыва. Одной из задач, связанных с гидроразрывом, является оценка параметров образующихся трещин. Термин «взрывной проппант» (*от англ. explosive containing proppant*) появился после публикации патента [1], где предлагалось вместе с проппантом (песком или керамикой), который используется для того, чтобы предотвратить закрытие трещины после снятия нагрузки, ввести в зону гидроразрыва взрывчатый материал. При детонации взрывчатки создается акустический сигнал, который улавливается дистанционными сейсмодатчиками и после обработки используется для получения информации о размерах гидроразрыва и его ориентации.

Фактически взрывной проппант представляет собой водонасыщенную смесь взрывчатого материала и песка. Он должен устойчиво детонировать в узких трещинах с раскрытием менее 10 мм. Взрывчатый материал в составе проппанта должен обладать высокой детонационной способностью, высокой энергетикой, термостойкостью, приемлемой стоимостью, безопасностью транспортировки и обращения в присутствии воды. По мнению авторов, перечисленным требованиям вполне удовлетворяет гексоген.

Детонационные свойства тройных смесей, аналогичных взрывному проппанту, ранее не исследовались. Цель настоящего исследования состоит в определении критических условий и параметров детонации трехкомпонентной взрывчатой смеси гексоген/вода/песок, предлагаемой для использования в качестве взрывного проппанта. Авторы выбрали стандартный полидисперсный гексоген (средний размер частиц 60 мкм); песок с размером частиц 0,63–1 мм моделировал расклинивающий проппант марки 16/30. Исследовались смеси, в которых отношение гексогена и песка варьировалось в широком пределе. Вода вводилась в количестве, обеспечивающем полное заполнение

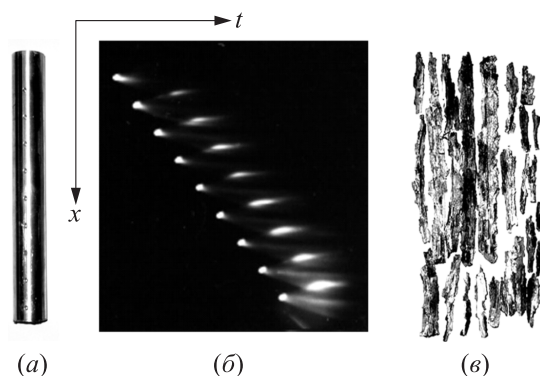


Рис. 1 Фотография оболочки перед опытом (а); щелевая фоторегистраграмма (б); фрагменты разрушенной оболочки после опыта (в). Скорость детонации 5350 м/с

поровых промежутков между частицами дисперсной фазы; ее типичное значение равнялось 14 %(вес.). Исследуемый образец помещался в канал оболочки из дуралюмина, материала, близкого по динамическим свойствам к известняку, одной из основных пород нефтеносных пластов. Канал оболочки имел цилиндрическую форму или форму плоской щели. Дополнительные серии опытов были проведены с гексогеном, рассеянным с помощью сит на узкие фракции, с мелким песком, а также при начальной температуре, повышенной до 90 °С. Экспериментальные данные по детонации исследуемых тройных смесей сопоставлены с термодинамическими расчетами.

Расчеты параметров детонации взрывного пропранта проводились с помощью программы DNITREM [2] с использованием уравнения состояния ВКWS. Принималось, что песок является инертной добавкой, которая находится в механическом равновесии с продуктами детонации смеси гексоген + вода, и имеет температуру, отличную от температуры продуктов детонации.

В первой серии опытов применялись цилиндрические оболочки внутренним диаметром 10 мм, внешним диаметром 35 мм и длиной 200 мм. По длине оболочки сверлили отверстия диаметром 1,5 мм с шагом 20 мм. Для усиления свечения при детонации в отверстия вводили небольшое количество порошкообразного тэна. Заряд инициировали стандартным капсулем-детонатором ЭД-8. Скорость детонации измеряли с помощью скоростного ждущего фоторегистра ЖФР-3. Пример регистрации для состава гексоген/вода/песок 29/18/53 дан на рис. 1.

Результаты измерения скорости детонации в зависимости от содержания полидисперсного гексогена в смеси даны на рис. 2. В диапазоне от 74 до 22 %(вес.) гексогена скорость детонации снижается от 6,7 до 5,0 км/с. При

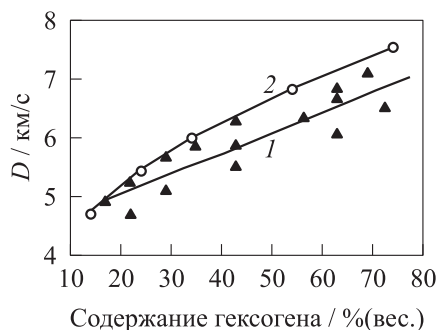


Рис. 2 Зависимость скорости детонации смесей гексоген/вода/песок от содержания гексогена: 1 — эксперимент в цилиндрической оболочке с каналом диаметром 10 мм; 2 — термодинамический расчет

В другой серии опытов было рассмотрено влияние размера частиц песка и гексогена (с этой целью из полидисперсного гексогена выделялись более узкие фракции размером менее 0,2 и 0,4–0,7 мм). Мелкая фракция песка имела частицы размером 0,25–0,4 мм. Укрупнение частиц гексогена привело к заметному снижению скорости детонации и увеличению критического диаметра детонации. Содержание гексогена, при котором детонация затухала в заряде диаметром 10 мм, увеличилось с 17 до 43 %(вес.). Мелкая фракция гексогена в сочетании с песком основной фракции (0,63–1 мм) не обнаружила заметных отличий от основной серии опытов.

Для определения критического размера детонации использовались оболочки с цилиндрическим и щелевым каналами ступенчатой формы. Определяющий размер (диаметр канала или раскрытие щели) оставался постоянным на длине 40–60 мм, а затем уменьшался на 1 или 2 мм и т. д. Максимальный размер на входе в канал оболочки равнялся 10, 7 или 5 мм. Ширина щелевого канала равнялась 20 мм. Оболочки со щелевым каналом изготавливали в виде двух разъемных пластин толщиной 10 мм, скрепляемых болтами. Важный результат этих исследований состоит в том, что, несмотря на уменьшение раскрытия, детонация проходит на всю длину канала, сохраняя постоянную скорость, величина которой лишь немного ниже измеренной для данного состава в цилиндрическом канале диаметром 10 мм. Достигнув участка, где раскрытие оказывается меньше критического, детонация резко обрывается. Такое поведение детонации исследуемых смесей напоминает детонацию жидких гомогенных ВВ, в случае которых, как известно, скорость детонации практически не зависит от диаметра заряда вплоть до критического диаметра [3].

содержании гексогена ниже 17 %(вес.) детонация в данном диаметре (10 мм) затухает. Корреляционная зависимость скорости детонации от содержания гексогена X (в весовых процентах) может быть представлена следующей формулой:

$$D = 4,33 + 0,035X \text{ [км/с]}.$$

Здесь же для сравнения приведены расчетные данные. Они находятся в хорошем согласии с экспериментом, хотя немного превышают измеренные значения. Согласуется также и вид зависимости скорости детонации от содержания гексогена.

Критические условия срыва детонации в плоских (h_{cr}) и цилиндрических (d_{cr}) каналах для оболочек из дуралюмина

Состав смеси гексоген/вода/песок, %(вес.)	Критическое раскрытие плоской щели, мм	Критический диаметр детонации, мм
17/13/70	—	≥ 10
22/13/66	4–5	~ 10
29/13/58	3–4	3–5
35/13/52	2–3	—
43/14/43	2–3	2–4
63/16/21	< 1	< 2

Данные по критическим условиям срыва детонации в щелевых каналах приведены в таблице. На смеси с 63%(вес.) гексогена детонация прошла с постоянной скоростью 6,5 км/с на всю длину оболочки; последняя секция оболочки имела раскрытие 1 мм (минимальная величина раскрытия в данной серии опытов). Можно заключить, что для этого состава критический размер щелевого заряда меньше 1 мм. В этой же таблице приведены данные, полученные аналогичным образом на сужающихся каналах цилиндрической формы. Видно, что с увеличением содержания гексогена критические размеры снижаются и при содержании выше 30%(вес.) детонация устойчиво распространяется в узких трещинах с раскрытием 1–3 мм.

Поскольку температура нефтеносных слоев, где предполагается использовать взрывной пропант, обычно выше нормальной температуры, была проведена серия опытов при температуре 90 °С. В опытах использовались оболочки с сужающимися щелевыми каналами. Результаты измерений скорости детонации, в пределах разброса, оказались почти такими же, как в опытах при нормальной температуре, однако критическое раскрытие канала снизилось почти в 3 раза. Граница для смесей, которые способны детонировать при раскрытии 10 мм, снизилась с 17 до 13%(вес.) гексогена. Отметим, что для жидких ВВ также наблюдается существенное снижение критического диаметра детонации с увеличением начальной температуры [4].

Итак, проведенные исследования показали, что гексоген может быть использован в качестве взрывчатой добавки к расклинивающему наполнителю, который закачивается в создаваемые трещины нефтеносных пластов. Опыты проводились в дюралюминиевых оболочках с цилиндрическими и плоскими каналами постоянного и уменьшающегося по длине сечения. Изучена зависимость скорости детонации от содержания гексогена в смеси в диапазоне 14–74%(вес.), размера частиц гексогена и песка и начальной температуры. Критический размер заряда, способного детонировать, снижается при увеличении содержания гексогена в смеси, составляя всего несколько миллиметров при содержании гексогена от 30% и выше. Поли-

дисперсный гексоген обеспечивает высокую детонационную способность смесей; узкие фракции гексогена, в особенности крупный гексоген с частицами размером 0,4–0,7 мм, заметно повышает критический диаметр детонации. Повышение начальной температуры от 20 до 90 °С в 3 раза снижает критический диаметр детонации. Детонация исследуемых смесей в сужающемся канале протекает с постоянной скоростью, которая мало отличается от скорости детонации, измеренной в цилиндрическом канале. Достигнув участка, где раскрытие канала оказывается меньше критического, детонация резко обрывается. Такое поведение детонации исследуемых смесей напоминает детонацию жидких гомогенных ВВ.

Термодинамические расчеты детонации взрывного пропанта показали хорошее согласие с экспериментом по скорости детонации и ее зависимости от содержания гексогена. Это дает основание заключить, что гексоген в смеси с водонаполненным песком детонирует в пределах узкой зоны реакции без существенных потерь тепла конвекцией на нагрев инертной добавки. Далее, благодаря согласию расчетных и измеренных скоростей детонации, можно с высокой степенью доверия относиться к другим расчетным характеристикам детонации, например к давлению детонации и теплоте взрыва. Достаточно высокие расчетные давления детонации исследованных смесей, лежащие в диапазоне от 7,4 до 21,5 ГПа при содержании гексогена 14–74%(вес.), можно рассматривать как благоприятный фактор, способствующий трещинообразованию и интенсивному дроблению породы, окружающей трещину гидроразрыва.

Авторы выражают благодарность Московскому научно-исследовательскому центру Шломберже за постановку проблемы, финансовую поддержку исследований и обсуждение результатов.

Литература

1. Willberg, D., J. Desroches, K. Babour, *et al.* 2006. Mapping fracture dimensions. Patent US7134492.
2. Имховик Н. А., Соловьев В. С. Расчет равновесных термодинамических параметров и состава продуктов детонации конденсированных ВВ // Вестник МГТУ, Сер. Машиностроение, 1993. № 2. С. 53.
3. Юхансон К., Персон П. Детонация взрывчатых веществ. — М.: Мир, 1973. 352 с.
4. Беляев А. Ф., Курбангалина Р. Х. Влияние начальной температуры на величину критического диаметра нитроглицерина и тротила // ЖФХ, 2960. Т. 34. С. 603.