

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/см<sup>2</sup>. 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/см<sup>3</sup> 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.

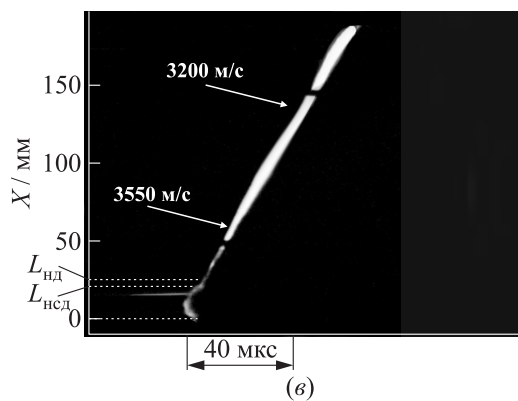
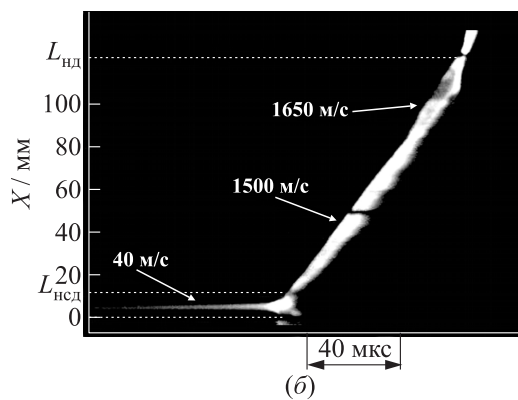
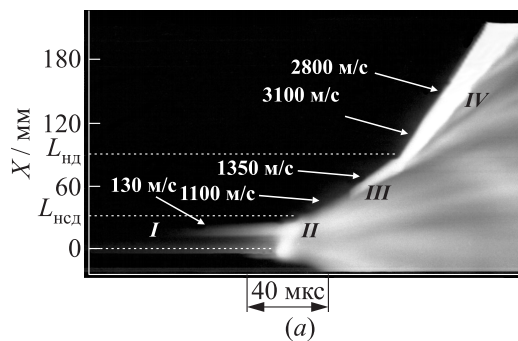
В исследованных смесях сценарий ПГД аналогичен наблюдаемому в индивидуальных взрывчатых веществ (ВВ) [1] и включает: КГ, НСД, переходящую в НД.

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 накаливания.

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.