

## ГОРЕНИЕ, ВЗРЫВ И УДАРНЫЕ ВОЛНЫ

УДК 662.612

### О КОНВЕКТИВНОМ ГОРЕНИИ СМЕСИ АЛЮМИНИЯ С ВОДОЙ

© 2014 г. Б. С. Ермолаев\*, В. Е. Храповский, В. М. Шмелев

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

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

Поступила в редакцию 25.06.2013

Изучено горение стехиометрической смеси алюминия (порошок марки ПАП-2) с водой в манометрической бомбе. Показано, что в зависимости от диаметра заряда и давления, создаваемого воспламенителем, возможны три ситуации: смесь не поджигается, смесь сгорает в медленном режиме (послойное горение) либо горит ускоренно с участием конвективного режима горения. Свойства процесса, наблюдаемые в режиме ускоренного горения, в том числе влияние давления, создаваемого при сгорании воспламенителя, длины и начальной плотности заряда, в целом аналогичны свойствам конвективного горения, которые наблюдаются в порошкообразных смесях алюминия с окислителем (ПХА или НА) и описаны в литературе. Отличие состоит в том, что из-за сравнительно низкой активности воды как окислителя конвективное горение смеси алюминия с водой протекает гораздо меньшими скоростями и возбуждается гораздо труднее.

*Ключевые слова:* горение алюминия, водород, окись алюминия, конвективное горение.

DOI: 10.7868/S0207401X14090040

#### ВВЕДЕНИЕ

Горение смесей алюминия с водой представляет интерес в качестве источника генерации водорода [1, 2]. Замороженные смеси находят применение в качестве дешевого и эффективного ракетного топлива [3, 4].

Практические вопросы, которые привлекают интерес исследований: приготовление смеси высокой плотности (используют резонансно-частотный смеситель, обеспечивающий рост плотности и вязкости смеси вплоть до получения ее пастообразной консистенции), дисперсность частиц алюминия, особенно при использовании наночастиц, условия поджигания, скорость горения. Устойчивое послойное горение пастообразной смеси требует давления не менее 7 МПа, при этом обычно используют достаточно энергичное воспламеняющее устройство. В работах [5, 6] сообщалось о наблюдении режима быстрого конвективного горения стехиометрической смеси алюминия с водой в полужамкнутом объеме при высоком давлении ~500 атм с использованием мощного воспламенителя и при низком давлении ~20 атм при мягком воспламенении образца большого диаметра.

Конвективное горение пористых смесей окислитель/горючее изучалось в ряде работ [7, 8]. Активно рассматривались смеси алюминия с перхлоратом аммония (ПХА) и нитратом аммония (НА), а также пиротехнические смеси [9]. Цель данной работы — исследовать возможность воз-

никновения конвективного горения в смеси алюминий–вода высокой пористости в замкнутом объеме. Объект нашего исследования — смесь воды с чешуйчатым алюминием (порошок марки ПАП-2) в весовом соотношении 50/50, теоретическая максимальная плотность смеси — 1.46 г/см<sup>3</sup>.

#### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ МЕТОДИКА

Алюминиевые частицы порошка марки ПАП-2 имеют чешуйчатую форму с тонкой окисной пленкой. Средняя толщина лепестков составляет 1–5 мкм, а средний линейный размер — 20–30 мкм. На поверхности имеется тонкое защитное жировое покрытие. Насыпной вес порошка — 0.15–0.2 г/см<sup>3</sup>, удельная площадь поверхности ~5 м<sup>2</sup>/г, содержание активного алюминия ~94%.

Порошок алюминия первоначально смешивался вручную с дистиллированной водой в заданной пропорции в стеклянном сосуде. Затем непосредственно перед опытами смесь загружали в смеситель “TURBULA” и проводили перемешивание в течение ~15 мин способом “пьяной бочки” до получения однородной дисперсной массы. Анализ структуры готовой смеси показал, что она состоит из микрокапель воды средним размером 50–100 мкм, поверхностный слой которых толщиной ~5–10 мкм насыщен чешуйками алюминия.

Готовая смесь в исходном состоянии при весовом соотношении Al/H<sub>2</sub>O = 1 : 1 имела плотность

0.29–0.32 г/см<sup>3</sup>. Фото смеси в бумажном стаканчике дано на рис. 1.

Опыты проводили в стандартной манометрической бомбе номинальным объемом около 100 см<sup>3</sup>. Смесь засыпали в стаканчики из картона диаметром от 10 до 25 мм и высотой до 90 мм или непосредственно в канал бомбы, имевший диаметр 33 мм. Горение инициировали навеской воспламенителя, который размещали над открытым торцом образца. Давление в бомбе регистрировали с помощью пьезокварцевого датчика марки AVL. Варьируя массу и состав воспламенителя (дымный порох марки ДРП в количестве от 0.1 до 1 г и смесь ДРП с порохом марки “Сокол” в количестве до 10 г), изменяли начальное давление, создаваемое в бомбе. Типичное время нарастания давления при сгорании воспламенителя равно 15–30 мс.

Манометрическая бомба – стандартное устройство, применяемое для получения первичных сведений о горении энергетического материала [10]. Диаграмма давление–время в объеме бомбы, регистрируемая в опыте, имеет ряд особенностей, которые позволяют, при выполнении предположений о характере горения, извлечь полезную информацию о поведении и свойствах процесса. Речь, прежде всего, идет о приросте давления в бомбе в результате сгорания образца и о темпе роста давления в бомбе. По приросту давления, зная плотность заряжения (отношение массы образца к объему бомбы), можно оценить силу пороха или, сравнивая с термодинамическим расчетом, оценить полноту сгорания. Конечно, здесь необходимо вводить поправку на потери тепла в стенки бомбы, которая, особенно при большом времени горения образца, достигающем 10 и более секунд, может составлять 20% и более.

Скорость изменения давления, получаемая дифференцированием диаграммы давление–время, пропорциональна скорости газовой выделению в объеме бомбы. Если рассматриваемый участок диаграммы относится к той фазе процесса, когда волна конвективного горения распространяется вдоль заряда, то темп роста давления будет тем больше, чем выше скорость волны. Если эта фаза завершилась и выполняется предположение, что весь объем бомбы равномерно заполнен горящими частицами энергетического материала, то по темпу роста давления можно вычислить интенсивность газовой выделению в единице объема (в г/см<sup>3</sup> · с<sup>-1</sup>), которая равна произведению массовой скорости послыонного горения на площадь поверхности горящих частиц.

Кроме того, диаграмму давление–время можно применить для оценки эффективной скорости горения. Предполагая, что исследуемая смесь горит параллельными слоями перпендикулярно оси заряда и газообразные компоненты продуктов го-



Рис. 1. Фотография смеси алюминия с водой стехиометрического состава.

рения, имеющие молекулярный вес  $M$  и температуру  $T$ , заполняют свободный объем бомбы  $V$ , можно получить следующую формулу:

$$U(t) = \frac{VM}{S\rho\varepsilon RT} \frac{dP}{dt}. \quad (1)$$

Здесь  $dP/dt$  – первая производная по времени экспериментальной диаграммы,  $S$  – площадь поперечного сечения заряда,  $\rho$  – плотность смеси,  $R$  – газовая постоянная,  $\varepsilon$  – массовый коэффициент выхода газообразных продуктов горения смеси.

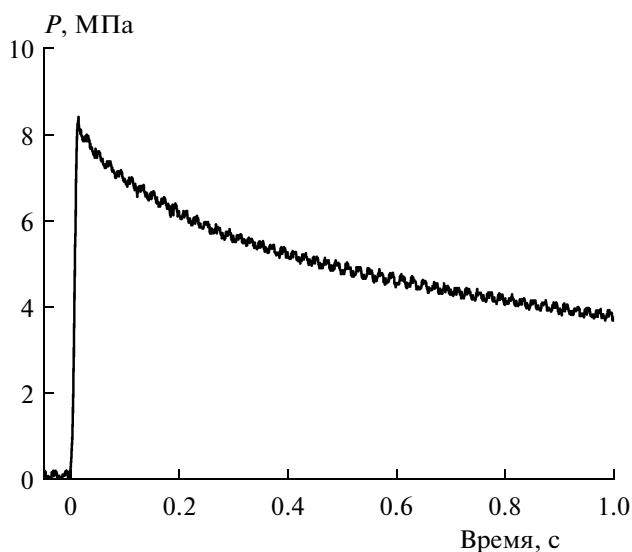
Продукты горения стехиометрической смеси алюминия с водой состоят практически полностью из конденсированного оксида алюминия и водорода. Температура горения смеси – 3300 К, выход водорода по массе – всего  $\varepsilon = 6/108$ , однако благодаря низкому молекулярному весу расчетный прирост давления при горении смеси в бомбе при плотности заряжения 0.1 г/см<sup>3</sup> и в отсутствие потерь тепла составляет ~76 МПа.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

### 1. Режимы горения

По результатам опытов, в которых варьировали давление, создаваемое воспламенителем, и диаметр заряда, можно выделить три характерные ситуации, представленные соответственно на рис. 2–4.

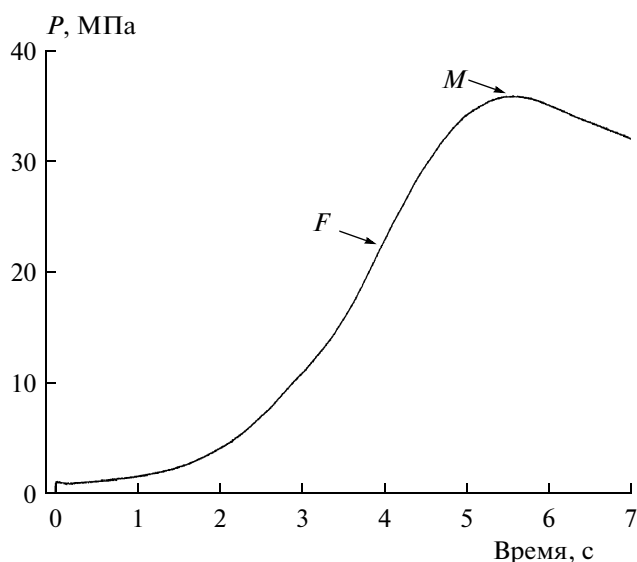
А. Воспламенитель не поджигает смесь (рис. 2). Давление достигает максимума по завершении горения воспламенителя и затем монотонно падает, смесь уплотняется (до плотности 0.8–0.95 г/см<sup>3</sup> в зависимости от давления, создаваемого воспла-



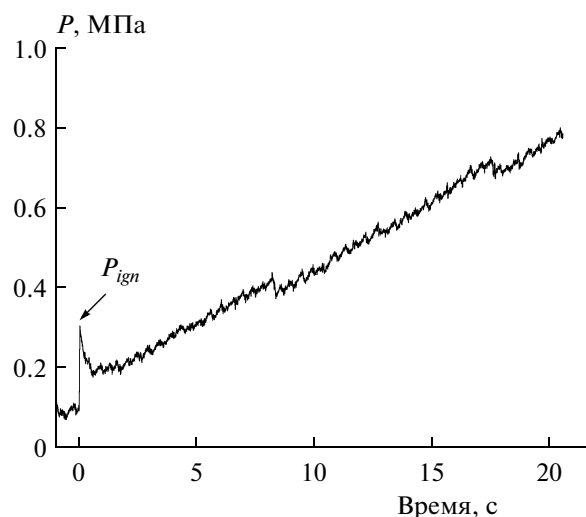
**Рис. 2.** Диаграмма давление–время при отсутствии воспламенения смеси. Диаметр образца – 11 мм, высота – 80 мм, пористость – 76%. Давление, создаваемое воспламенителем, равно 8.2 МПа.

менителем), но не горит. Стаканчик после опыта оставался целым, его верхняя часть слегка обгорела, некоторое количество смеси выброшено из стаканчика в объем бомбы.

**Б.** Смесь поджигается, но горит медленно в послойном режиме (рис. 3). Горение длится более 20 с, темп роста давления в процессе горения  $\sim 0.034$  МПа/с. После опыта остается пористый каркас из спекшейся массы, заполняющий силь-



**Рис. 4.** Диаграмма давление–время при ускоренном горении смеси. Диаметр образца – 25 мм, высота – 56 мм, пористость – 68%. Прирост давления от сгорания воспламенителя составляет 1.0 МПа.



**Рис. 3.** Диаграмма давление–время при медленном послойном горении смеси. Диаметр образца – 25 мм, высота – 63 мм, пористость – 79%. Прирост давления от сгорания воспламенителя составляет 0.2 МПа.

но обгоревший стаканчик. Небольшое количество массы выброшено в объем камеры.

**В.** Смесь поджигается и горит в ускоренном режиме (рис. 4). После срабатывания воспламенителя (точка со значением давления 1.1 МПа) на диаграмме наблюдается неглубокий спад и последующий рост давления с возрастающим темпом до точки *F*. Затем темп роста давления падает, и давление, пройдя точку максимума *M*, начинает снижаться. После опыта в бомбе остается каркас из спекшихся частиц высотой от половины до трети высоты исходного заряда, часть твердой массы в виде отдельных частиц и конгломератов выброшена в объем бомбы.

## 2. Пороговые границы режимов

Границы, которые разделяют область, где заряд не горит, и две области, где реализуются режимы медленного и ускоренного горения, можно изобразить (хотя и достаточно условно из-за ограниченности данных) на плоскости с координатами: давление (создаваемое при сгорании воспламенителя) – диаметр заряда. Эти данные приведены на рис. 5. Левее наклонной линии, уходящей круто вверх при значении диаметра 20 мм и низких давлениях к точке со значением давления 40 МПа при диаметре 11 мм (область *1*), смесь не горит. Причиной скорее всего являются низкая активность воды как окислителя и ее высокая теплота испарения. Довольно большие затраты тепла, требуемые для поджигания смеси, приводят к тому, что воспламенитель как средство инициирования горения уступает по эффективности спирали накаливания, при использовании которой

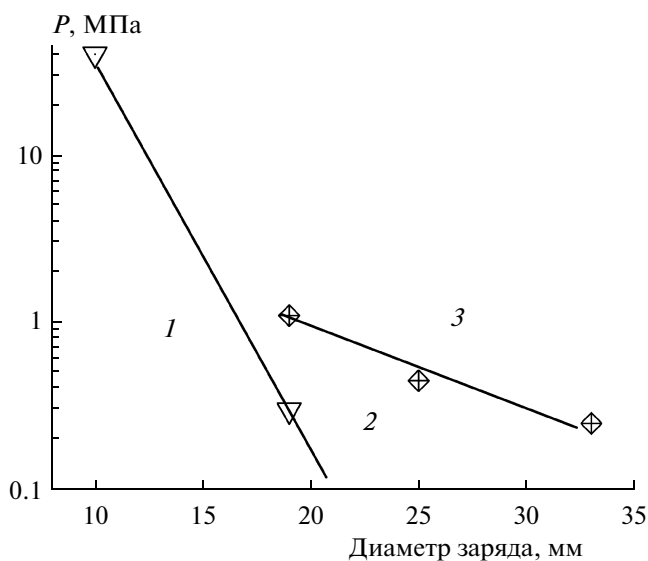


Рис. 5. Области, где горение отсутствует (1), и где реализуется медленное (2) и ускоренное (3) горение смеси алюминий–вода.

критический диаметр горения при атмосферном давлении оказался равным 5 мм [6].

Правее этой линии в области низких давлений (область 2) реализуется медленное послойное горение. Ускоренное горение (область 3) связано с режимом конвективного горения и требует более высоких давлений и больших диаметров заряда.

### 3. Свойства ускоренного режима горения

Влияние начального давления, создаваемого при сгорании воспламенителя, на горение смеси в бомбе для зарядов диаметром 25 мм показано на рис. 6. Результаты опытов приведены в табл. 1. Видно, что с ростом начального давления время горения заряда (отсчитываемое от точки начала горения до точки максимума давления) снижается, прирост давления от сгорания заряда возрастает, хотя и с заметным разбросом. Изменяется и форма диаграмм: если при сравнительно низком давлении воспламенителя диаграмма давления имеет длительный участок с выпуклостью вниз, то с ростом давления воспламенителя этот участок

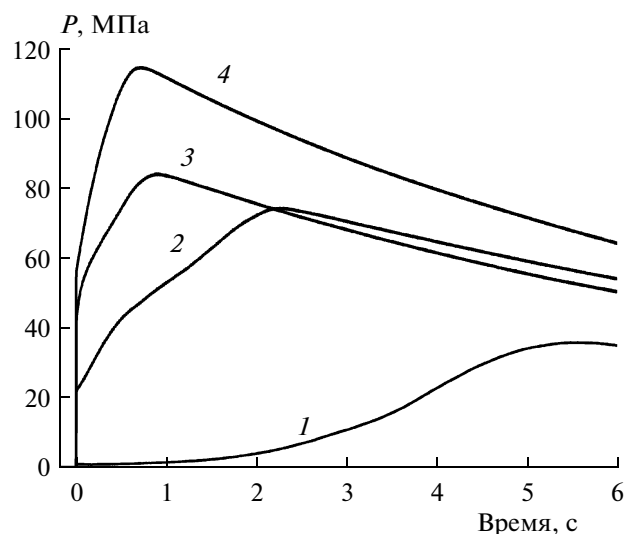


Рис. 6. Диаграммы давление–время в манометрической бомбе при ускоренном горении смеси в зарядах диаметром 25 мм при различных давлениях, создаваемых при сгорании воспламенителя, МПа: 1.1 (1), 22.6 (2), 43 (3), 56 (4).

уменьшается и, наконец, вовсе исчезает, и диаграмма в целом приобретает выпуклость вверх.

Влияние длины заряда на диаграмму давление–время при ускоренном горении смеси в манометрической бомбе представлено на рис. 7 и в табл. 2. Диаметр заряда – 33 мм, давление, создаваемое воспламенителем, равно 1.1 МПа, длина заряда изменялась от 23 до 79 мм, т.е. в 3.4 раза. Эффект оказался значительно сильнее: прирост давления вырос в 26 раз, а максимальный темп роста давления – в 75 раз.

Влияние диаметра заряда на горение смеси показано на рис. 8. Опыты проводились при одинаковой массе воспламенителя, создающего при сгорании давление около 1.1 МПа, и близкой длине заряда (78–80 мм). Опыт с зарядом диаметром 19 мм “попадает” на границу, разделяющей области ускоренного и медленного горения. Максимальный темп роста давления составлял 3.5 МПа/с, прирост давления – 17.5 МПа. При диаметре заряда 25 мм темп роста давления увеличился почти на порядок – до 34.3 МПа/с, прирост давления увеличился вдвое. Наконец, при дальнейшем увеличении диаметра заряда до 33 мм темп роста дав-

Таблица 1. Результаты опытов по горению заряда диаметром 25 мм, которые приведены на рис. 6

Номер опыта	Давление от воспламенителя, МПа	Давление в точке максимума, МПа	Прирост давления в ходе горения заряда, МПа	Время горения заряда, с
1	1.1	36.1	35	5.6
2	22.8	74.9	52.1	2.3
3	43	84.5	41.5	0.9
4	56	115	59	0.7

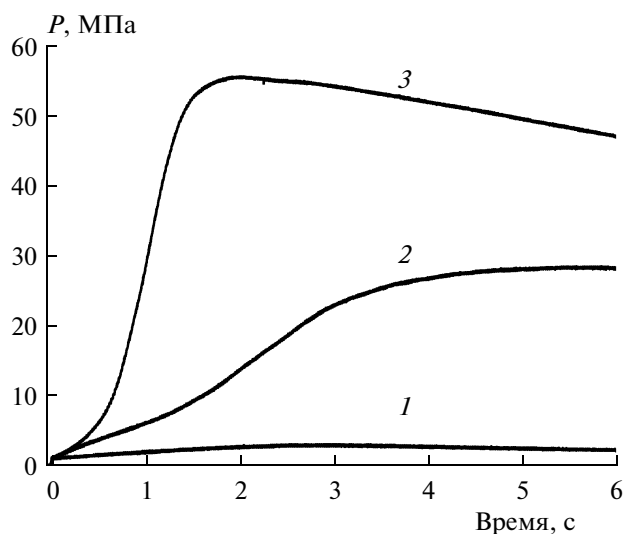


Рис. 7. Диаграммы давление–время в манометрической бомбе при ускоренном горении смеси в зарядах диаметром 33 мм в зависимости от начальной высоты заряда, мм: 23 (1), 53 (2) и 79 (3). Давление, создаваемое воспламенителем, равно 1.1 МПа.

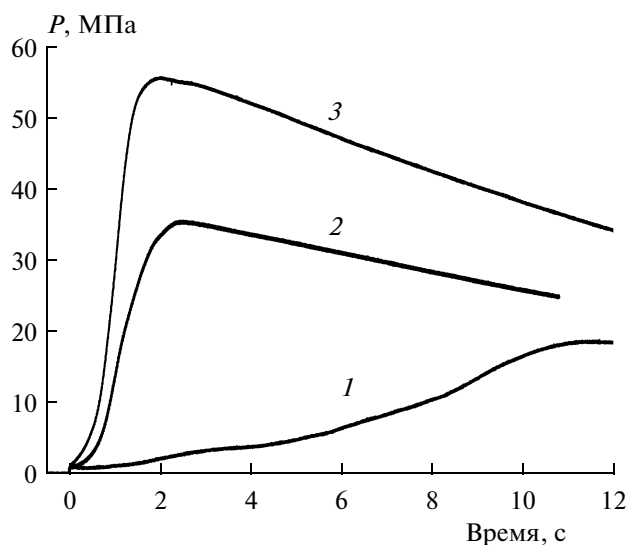


Рис. 8. Диаграммы давление–время в манометрической бомбе при ускоренном горении смеси в зарядах разного диаметра, мм: 19 (1), 25 (2) и 33 (3). Длина образцов – 78–80 мм.

ления увеличился ровно в два раза (т.е. пропорционально увеличению площади сечения образца), максимальное давление также возросло.

Влияние начальной плотности заряда на горение смеси показано на рис. 9. Опыты проведены с зарядами диаметром 25 мм и плотностью 0.29 и 0.47 г/см<sup>3</sup>. Увеличение плотности достигнуто путем легкой вибрации смеси, помещенной в стаканчик. Видно, что при близких давлениях в точке максимума (35.3 и 36 МПа при массе первого и второго образцов 12 и 12.9 г соответственно) горение заряда более высокой плотности протекает значительно медленнее. Время горения этого заряда составляет 5.6 с по сравнению с 2.5 с для заряда с низкой плотностью, а максимальный темп роста давления – 15.2 вместо 35.3 МПа/с соответственно.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Рассмотрим факты, указывающие на участие фильтрации и конвективной передачи тепла от газообразных продуктов горения к поверхности пор в механизме ускоренного горения смеси алю-

миний–вода. Напомним, что процесс быстрого горения пористых энергетических материалов, контролируемый конвективной передачей тепла, получил название “конвективное горение” [10]. В типичных смесях окислителя с горючим (например, в смесях ПХА с алюминием) конвективное горение развивается очень бурно: горение в манометрической бомбе, например, занимает десятые/сотые доли секунды [7]. Вода уступает по активности ПХА, поэтому можно ожидать, что конвективное горение смеси с алюминием будет довольно медленным.

Само по себе наличие газопроницаемой пористости открывает лишь возможность для фильтрации продуктов горения в поры. Для конвективного горения требуется, чтобы в ходе воспламенения или горения пористого заряда были превышены некие критические условия (обычно это критическое давление срыва послышного горения), когда скорость волны нагрева и воспламенения, бегущей вдоль поверхности пор под действием конвективной передачи тепла, окажется выше скорости послышного горения [10]. Если этот порог преодолен и другие факторы сложились благоприятно, то волна конвективного горе-

Таблица 2. Результаты опытов с зарядами разной длины, приведенные на рис. 7

Номер опыта	Длина заряда, мм	Давление в точке максимума, МПа	Прирост давления в ходе горения заряда, МПа	Время горения заряда, с	Максимальный темп роста давления, МПа/с
1	23	3.2	2.1	2.9	0.9
2	53	28.4	27.3	5.6	10
3	79	55.5	54.4	1.92	68

ния быстро формируется и ее скорость может достичь высоких значений.

Поведение конвективного горения зависит от многих факторов. Применительно к горению в манометрической бомбе выделим два фактора, особо сильно воздействующих на развитие волны конвективного горения. Это темп роста давления в бомбе и длина заряда. Когда давление в бомбе растет, это действует как своего рода поршень, заталкивающий горячие газы в поры. При этом существует сильная обратная связь: чем быстрее растет давление, тем выше скорость фильтрации газа и выше скорость конвективного горения, а рост последней благодаря увеличению массы горящего вещества еще более повышает темп роста давления в бомбе. Что касается длины заряда, то как только фронт фильтрации достигает закрытого торца заряда, поры быстро заполняются газом и “заталкивать” новые порции газа в поры, даже при росте давления в бомбе, становится трудно: скорость фильтрации резко снижается. Если заряд короткий, то эффект заполнения пор газом может проявиться очень быстро, еще до того как конвективное горение наберет достаточную скорость. В результате скорость фильтрации резко уменьшается и скорость конвективного горения может упасть до очень низкого уровня. Увеличив длину заряда, пусть не слишком сильно, мы уходим от этой границы, потому что время, требуемое для заполнения пор газом, растет пропорционально квадрату длины заряда по формуле [10]

$$t \sim \frac{\mu}{P} (L/d_p)^2. \quad (2)$$

Здесь  $\mu$  – вязкость газа,  $d_p$  – диаметр пор и  $P$  – перепад давления в волне фильтрации. Оценки по этой формуле применительно к условиям проведенных опытов дают для характерного времени значения на уровне 0.01 – 0.1 с.

Среди результатов, представленных в работе, именно данные о горении смеси, полученные для зарядов разной длины (рис. 7 и табл. 2), наиболее ясно демонстрируют вклад фильтрации/конвекции. Можно считать, что 23-миллиметровый заряд действительно имеет небольшую длину, при которой конвективное горение, если и проявляется себя, то довольно слабо. При увеличении длины заряда до 53 мм темп роста давления повысился на порядок. Видно, что различие в темпах роста давления в этих двух опытах имеет место сразу же после срабатывания воспламенителя. Объяснение этих различий, связанное с тем, что в случае более длинного заряда ограничение, вызванное выходом фильтрации на закрытый торец заряда, наступило много позднее и к этому моменту скорость конвективного горения оказалась уже достаточно высокой, представляется вполне очевидным. При переходе от заряда длиной 53 мм к заряду длиной 79 мм (т.е. при увеличении длины

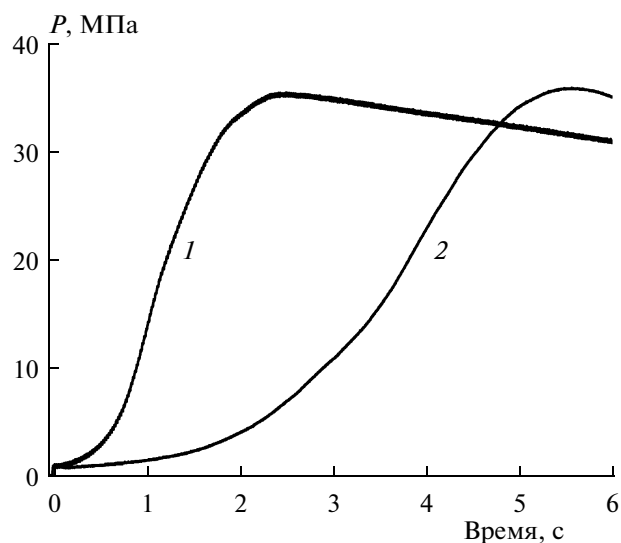
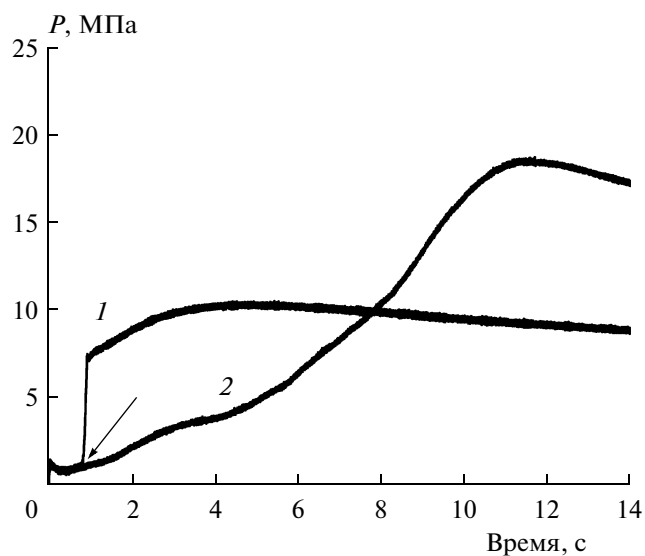


Рис. 9. Диаграммы давление–время при ускоренном горении смеси в манометрической бомбе в зарядах различной плотности: 0.29 (1) и 0.47 г/см<sup>3</sup> (2). Диаметр зарядов – 25 мм, давление при сгорании воспламенителя ~1 МПа.

заряда всего в полтора раза) диаграммы давления в течение первых 0.2 с идут практически одинаково, однако затем диаграмма для более длинного заряда уходит вверх с ускорением. В результате максимальный темп роста давления повышается еще почти в 7 раз. То же самое объяснение легко применимо и в этом случае.

Итак, мы пришли к заключению, что время фазы распространения волны горения на всю длину заряда скорее всего составляет лишь малую часть от полного времени горения смеси. Чтобы подтвердить этот вывод, были проведены дополнительные опыты, в которых на дно заряда укладывалась таблетка быстрогорящего ВВ – бензотрифуроксана (БТФ) массой около 1 г и высотой около 1 мм. При подходе фронта горения к донному торцу заряда таблетка БТФ быстро сгорает, давая резкий короткий подъем давления с амплитудой 10–15 МПа и более. Этот момент можно рассматривать как время завершения стадии распространения волны конвективного горения по длине заряда.

Опыты проводились в стаканчиках из плексигласа диаметром 19 мм (отрезок трубки длиной 90 мм, толщина стенок – 3 мм, дно закрыто фланцем, соединение на клею). Сопоставлялись параллельные опыты – с таблеткой БТФ и без нее. Пример результатов для одной пары опытов приведен на рис. 10. Видно, что при давлении воспламенителя 1.1 МПа время до срабатывания таблетки БТФ (т.е. до завершения стадии конвективного горения) составляет менее 0.8 с. Если для этого примера оценить грубо среднюю скорость конвек-



**Рис. 10.** Диаграммы давление–время при ускоренном горении смеси в манометрической бомбе в зарядах с таблеткой БТФ (1) и без нее (2) при давлении от сгорания воспламенителя 1.1 МПа. Стрелка указывает момент начала горения таблетки БТФ. Заряды находились в стаканчиках из плексигласа диаметром 19 мм.

тивного горения (по длине заряда и времени), то она составит около 100 мм/с. При осмотре бомбы после опыта обнаружилось, что твердый остаток в стаканчике имел высоту около 40 мм и центральный канал диаметром около 10 мм, по-видимому, образовавшийся после срабатывания таблетки БТФ. В других опытах, когда давление от воспламенителя было уменьшено до 0.4 МПа, время до срабатывания таблетки БТФ возросло до 4.2 с. Таким образом, при уменьшении начального давления скорость конвективного горения заметно упала, что является вполне ожидаемым эффектом.

Несколько слов нужно сказать о приросте давления в бомбе, который в зависимости от условий горения может, как показано выше, различаться почти на два порядка. Мы видим две возможные причины столь сильного эффекта. Во-первых, вполне возможно, что значительная часть массы образца остается несгоревшей, что особенно справедливо, если речь идет об опытах, проведенных вблизи границы области, где смесь не удается поджечь. Можно предположить, что конвективное горение не охватывает однородно все сечение образца, т.е. фронт волны горения проскакивает главным образом по центру заряда, выбрасывая центральную часть образца в объем бомбы и оставляя пристеночную часть в стаканчике в виде уплотненной массы. Горение этой массы смеси затруднено, и лишь часть ее медленно сгорает в послойном режиме.

Во-вторых, продукты горения смеси, которые в значительной массе представляют собой кон-

денсированный оксид алюминия, благодаря излучению могут охлаждаться гораздо сильнее, чем привычные продукты горения пороховых композиций. В самом деле, приведем следующую оценку. Рассмотрим образец смеси, который начинает гореть с открытого торца с эффективной скоростью  $U$ . Нарастающий каркас оксида алюминия аккумулирует большую часть энергии горения, прирост которой в единицу времени на единицу поверхности приближенно можно оценить по формуле  $C_p U T_m$  (произведение удельной теплоемкости каркаса на плотность смеси, скорость и температуру горения). Охлаждение каркаса в результате излучения с поверхности торца на начальной стадии горения идет с интенсивностью (в тех же единицах)  $\sigma T_m^4$ , где  $\sigma$  – постоянная Стефана–Больцмана. При температуре горения  $\sim 3300$  К эта величина составляет  $\sim 6$  МДж/м<sup>2</sup> · с<sup>-1</sup>. Такую же величину дает оценка прироста энергии каркаса за счет горения смеси при скорости  $U = 5$  мм/с. Таким образом, торец каркаса быстро охлаждается, и эффект тем сильнее, чем меньше скорость горения смеси.

По мере нарастания каркаса излучение идет с боковой поверхности. Ясно, что при ширине зоны излучения, равной четверти диаметра заряда, поверхность излучения и поверхность горения будут одинаковы. Таким образом, оценки, полученные для охлаждения торца, справедливы и для боковой поверхности каркаса. Газообразные продукты (водород), проходя сквозь охлажденный каркас оксида алюминия, охлаждаются и попадают в объем бомбы при температуре, которая может быть в несколько раз ниже температуры горения. При этом температура газа будет тем ниже, чем меньше скорость горения смеси. Пропорционально снижению температуры уменьшается прирост давления в бомбе. Вполне возможно, что в ряде опытов одновременно действовали оба фактора – недогорание смеси и охлаждение газообразных продуктов горения.

## ВЫВОДЫ

Проведены опыты по горению стехиометрической смеси алюминия (порошок марки ПАП-2) с водой в манометрической бомбе. Показано, что в зависимости от диаметра заряда и давления, создаваемого воспламенителем, возможны три ситуации: смесь не поджигается, смесь сгорает в медленном режиме (послойное горение) либо горит ускоренно с участием конвективного режима горения. Свойства процесса, наблюдаемые в режиме ускоренного горения, в том числе влияние длины заряда, увеличение которой вызывает рост скорости горения смеси в бомбе почти на два порядка величины, а также влияние давления, создаваемого сгоранием воспламенителя, и начальной

плотности заряда, в целом аналогичны свойствам конвективного горения, которые наблюдаются в порошкообразных смесях алюминия с окислителем (ПХА или НА) и описаны в литературе. Различие состоит в том, что из-за сравнительно низкой активности воды как окислителя конвективное горение смеси алюминий–вода протекает с гораздо меньшими скоростями и возбуждается гораздо труднее.

Работа выполнена при поддержке Министерством образования и науки Российской Федерации (ГК № 14.516.11.0046).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ingenito A., Bruno C.* // J. Propulsion and Power. 2004. V. 20. № 6. P. 1056.
2. *Shafirovich E., Diakov V., Varma A.* // Combust. and Flame. 2006. V. 144. № 1–2. P. 415.
3. *Wood T.D., Pfeil M.A., Pourpoint T.L. et al.* // Proc. 45th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conf. & Exhibit 2. Denver: AIAA Publ., 2009. P. 10.
4. *Pourpoint T.L., Wood T.D., Pfeil M.A. et al.* // Intern. J. Aerospace Engineering. 2012. Article ID 874076. 11 pages.
5. *Комиссаров П.В., Ибрагимов Р.Х., Соколов Г.Н., Борисов А.А.* // Сб. тр. “Горение и взрыв” / Под общ. ред. Фролова С.М. М.: Торус Пресс, 2009. Вып. 2. С. 73.
6. *Шмелев В.М., Финяков С.В.* // Там же. 2013. Вып. 6. С. 169.
7. *Храповский В.Е., Худавердиев В.Г.* // Хим. физика. 2010. Т. 29. № 1. С. 39.
8. *Храповский В.Е., Худавердиев В.Г., Сулимов А.А.* // Сб. “Горение и взрыв” / Под общ. ред. Фролова С.М. М.: Торус пресс, 2013. Вып. 6. С. 211.
9. *Долгобородов А.Ю., Сафронов Н.Е., Теселкин В.А. и др.* // Там же. 2013. Вып. 6. С. 302.
10. *Беляев А.Ф., Боболев В.К., Коротков А.И., Сулимов А.А., Чуйко С.В.* Переход горения конденсированных систем во взрыв. М.: Наука, 1973.