

Распространение пламени при начальных давлениях 1-100 *ата* регистрировалось индикатором давления ИД-2И, снабженным набором чувствительных датчиков типа ДД-10. Сигнал с индикатора давления подавался на вход осциллографа С1-4, на экране которого визуально наблюдался процесс нарастания давления в случае распространения пламени по смеси водорода с кислородом. Считалось, что смесь взрывоопасна, если было зарегистрировано заметное повышение давления. Для каждого состава смеси при заданном давлении опыт повторялся два раза.

### Обсуждение результатов

На рис. 2 представлена зависимость концентрационных пределов распространения пламени в водородо-кислородных смесях в диапазоне начальных давлений от 1 до 100 *ата* и температуре 20° С. Эта зависимость ограничивается двумя кривыми, соответствующими нижнему и верхнему пределам. Нижний предел с повышением давления постепенно изменяется от 4,5%  $H_2$  при 1 *ата* до 6,0%  $H_2$  при 50 *ата* и далее, вплоть до давления 100 *ата* остается постоянным.

Сопоставление полученных результатов с результатами работы [5] дает достаточно хорошее совпадение нижнего предела распространения пламени в водородо-кислородной и водородо-воздушной смесях в исследуемом диапазоне давлений. Хорошее согласие полученных результатов наблюдается и при сравнении их с результатами работы [4]. Небольшое различие в поведении верхней ветви (порядка нескольких десятых процента) вполне объясняется различными методами определения. Что касается нижней ветви рис. 2, то она полностью укладывается в зону, названную авторами зоной предпламенного горения.

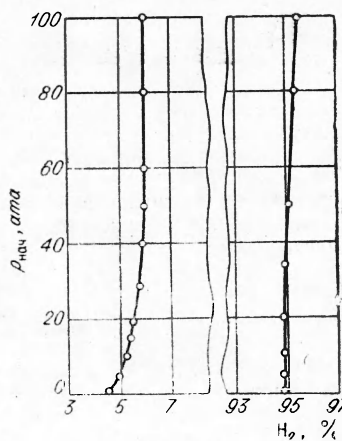


Рис. 2.

Поступила в редакцию  
12/1 1970

### ЛИТЕРАТУРА

1. A. C. Egerton, J. Powling. Proc. Roy. Soc., 1948, **A 190**, 172, 190.
2. H. F. Coward, G. W. Jones. U. S. Bur. Mines. Bull., 503 (1952).
3. M. G. Zabetakis. Flammability characteristics of combustible gases and vapors. Washington, 1965.
4. С. А. Янговский, М. В. Черняк. ЖФХ, 1966, **40**, 2899.
5. E. Berl, G. Werner. Z. angew. Chem. 1927, **40**, 245.
6. D. M. Newitt, D. T. Townsend. A Science of petroleum, 1939. **4**, 2884.

УДК 662.215.2

### О МЕХАНИЗМЕ ГОРЕНИЯ ЧАСТИЦ МЕТАЛЛА

П. Ф. Похил, В. С. Логачев, В. М. Мальцев  
(Москва)

Настоящая работа посвящена исследованию горения конденсированных систем, содержащих в качестве добавки такие металлы, как алюминий, магний и их сплавы. Известно [1, 2], что беспламенное горение является начальной стадией горения конденсированных систем и осуществляется практически в изолированном виде в усло-

виях вакуума. Устойчивость беспламенного горения обуславливается тепловым эффектом реакций, протекающих в реакционном слое конденсированной фазы.

Температура поверхности при беспламенном горении баллиститных составов  $T_{\text{п}} = 300^{\circ}\text{C}$ , а модельного состава горючее — перхлорат аммония, исследованного в наших экспериментах,  $T_{\text{п}} = 480^{\circ}\text{C}$ .

Очевидно, что если частицы металла будут реагировать при беспламенном горении металлизированных составов, то это должно сказаться на температуре поверхности и тепловом эффекте реакций, протекающих в реакционном слое конденсированной фазы.

Так как упругость пара алюминия и магния при  $T \approx 500^{\circ}\text{C}$  низкая (упругость пара алюминия ( $p$ ) при  $T = 660^{\circ}\text{C}$  равна  $5,25 \cdot 10^{-7}$  мм рт. ст., а магния при  $T = 751^{\circ}\text{C}$   $p = 10$  мм рт. ст.), то реакция алюминия и магния с окислителем при этой температуре может протекать только на поверхности частиц металла.

Из результатов работ [1, 2] по самовоспламенению составов в вакууме следует: для того чтобы составы горели в вакууме ( $p = 10^{-2}$  мм рт. ст.), необходимо образец перед поджиганием (от накаленной спирали) предварительно нагреть до такой температуры, когда количество тепла, выделяющегося за счет суммарно-экзотермического процесса разложения, протекающего в конденсированной фазе, будет достаточным для обеспечения устойчивого самораспространения горения состава в этих условиях.

Эксперименты проводились на установке, подробно описанной в работе [1], с образцами цилиндрической формы диаметром 5 и высотой  $7 \div 10$  мм.

Было установлено, что баллиститный состав устойчиво горит при предварительном подогреве до минимальной температуры  $T_0 = 110^{\circ}\text{C}$ , а состав на основе перхлората аммония — до  $T_0 = 200^{\circ}\text{C}$ .

Зная минимальную температуру предварительного подогрева состава, когда возможно устойчивое беспламенное горение образца, подожженного от спирали, и температуру на поверхности образца при беспламенном горении  $T_{\text{п}}$ , можно оценить тепловой эффект суммарно-экзотермического процесса в реакционном слое конденсированной фазы:

$$Q = \bar{c} (T_{\text{п}} - T_0) (\bar{c} \approx 0,4 \text{ кал/г} \cdot \text{град}^{\circ}).$$

Из полученных результатов следует, что в случае беспламенного горения баллиститных составов с добавкой алюминия  $T_{\text{п}} = 300^{\circ}\text{C}$ , т. е. такая же, как и для баллиститных составов без добавки металла. Это говорит о том, что частицы алюминия в баллиститных составах начинают воспламеняться и гореть не на поверхности состава, а в дымгазовой зоне факела пламени вблизи поверхности заряда.

В случае же беспламенного горения модельных составов на основе перхлората аммония с добавкой алюминия, магния и их сплава 50/50 температура поверхности увеличивается по сравнению с температурой поверхности заряда без добавки металла.

На рис. 1 показан непрерывный рост температуры поверхности для всех составов вплоть до 20% добавки металла, что обусловлено увеличением количества тепла, выделяющегося в конденсированной фазе за счет реакций окисления на поверхности частиц металла. Следует также отметить, что температура поверхности заряда увеличивается с уменьшением размера частиц фракции металла, добавляемого в состав, а также с увеличением концентрации металла (в исследуемой области до 20% добавки металла в модельном составе).

Модельный состав на основе перхлората аммония с добавкой  $\eta \geq 5\%$  алюминия и с  $d \leq 1$  мк при предварительном подогреве до  $T_0 = 200^{\circ}\text{C}$  после поджигания горит с очень большой скоростью (со взрывом), не позволяющей измерить температуру поверхности с помощью термопары.

Как видно из рисунка, процент тепла, выделяющегося в конденсированной фазе за счет реакции окисления алюминия, магния и сплава алюминий — магний, растет с ростом добавки металла в заряде и достигает  $\sim 40\%$  для Mg ( $d = 1-10$  мк);  $\sim 35\%$  для Al — Mg (50/50) ( $d = 10-100$  мк) и  $\sim 25\%$  для Al ( $d = 20-60$  мк) от всего тепла, выделяющегося в конденсированной фазе.

Большая реакционная способность магния по сравнению с алюминием, по-видимому, обуславливается свойствами окисной пленки, для которой критерий Пиллинга-Бедворса равен  $\beta \approx 0,8$ , а для алюминия  $\beta \approx 1,4$ . Г. В. Самсонов и К. И. Портной [3] отмечают, что при очень больших значениях  $\beta$  окисный слой получает значительные внутренние напряжения, растрескивается и теряет защитные свойства, поэтому наибольшими защитными свойствами обладают слои, для которых  $\beta$  не очень превышает единицу. Это в полной мере относится к алюминию.

На рис. 2 показана зависимость отношения тепла, выделяющегося за счет металла в к-фазе, ко всему теплу, реализующемся при полном сгорании добавки металла в составе. На рисунке виден максимум для всех исследованных составов в области 10—13% добавки металла в смеси горючее — перхлорат аммония. Уменьшение этого отношения с увеличением добавки металла в заряде до 20%, возможно, обусловлено ростом отрицательного кислородного баланса горючее — окислитель, а также слиянием частиц металла на поверхности горящего заряда с образованием более крупных частиц.

Частицы алюминия воспламеняются в факеле пламени баллиститного состава Н

при температуре около  $1000^{\circ}\text{C}$ . Температура воспламенения была определена по началу возникновения ярко светящегося ореола вокруг частицы алюминия (рис. 3). Зная распределение температуры по высоте факела пламени и место появления светящегося ореола вокруг частицы, можно было приблизительно оценить температуру воспламенения. По литературным данным [4, 5], температура воспламенения частиц алюминия различная и меняется приблизительно от 600 до  $2050^{\circ}\text{C}$ . По-видимому, на температуру воспламенения алюминия оказывают влияние условия поджигания и окружающей среды.

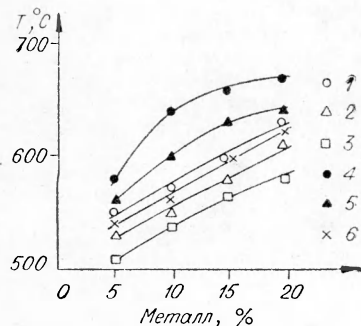


Рис. 1. Зависимость температуры поверхности модельных составов горючее — перхлорат аммония от процента содержания добавки металла в заряде. Размер частиц ( $\mu\text{к}$ ) Al: 1 — 5—10, 2 — 11—13, 3 — 20—60; Mg: 4 — 1—10, 5 — 80—90; Al—Mg 50/50: 6 — 10—100.

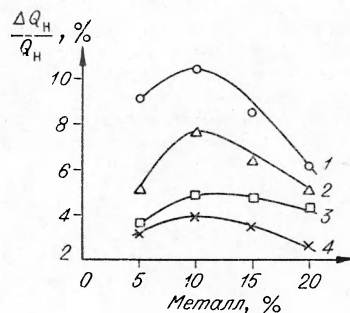


Рис. 2. Процент металла, реагирующего в к-фазе в зависимости от процента добавки металла в смеси горючее — перхлорат аммония.

Размер частиц ( $\mu\text{к}$ ) Mg: 1 — 1—10; 2 — 80—90; Al—Mg 50/50: 3 — 10—100; Al: 4 — 20—60.

Проведенные измерения температурного профиля по высоте факела пламени баллистического состава Н с добавкой алюминия показали, что он лежит выше температурного профиля пламени состава Н без алюминия. Этот экспериментально установленный результат является убедительным доказательством горения частиц алюминия с выделением дополнительного тепла после воспламенения при  $T=1000^{\circ}\text{C}$ .

Следует отметить, что воспламенение частиц алюминия по высоте факела пламени зависит от их размера. Это связано со временем прогрева частиц до температуры окружающей среды, которое, как известно, пропорционально  $d^2$ .

Очевидно, чем больше размер частиц, тем больше требуется времени для ее нагрева до температуры воспламенения. Поэтому мелкие частицы воспламеняются в факеле пламени вблизи поверхности состава, когда достигается температура частицы около  $1000^{\circ}\text{C}$ . Крупные же частицы алюминия могут воспламеняться соответственно на большем расстоянии от поверхности пороха. Если к фракции с крупными частицами добавить небольшой процент по весу мелких частиц алюминия, то воспламеняемость крупных частиц улучшается. Поджигающее действие мелких частиц обуславливается их радиацией и непосредственным действием при соударении с крупными негорящими частицами.

На основании результатов скоростной киносъемки было установлено, что скорость горения частиц алюминия на порядок меньше скорости горения баллистического состава и возрастает с увеличением температуры окружающего газа. Так, например, при температуре окружающего газа  $\sim 2000^{\circ}\text{C}$  частицы алюминия диаметром  $100 \mu\text{к}$  (образовавшиеся на поверхности горения заряда в результате слияния) горят со скоростью  $0,55 \text{ мм/сек}$ , а частицы с  $d=40 \mu\text{к}$  — со скоростью  $0,7 \text{ мм/сек}$ . При температуре окружающего газа  $2600^{\circ}\text{C}$  частицы с  $d=100 \mu\text{к}$  горят со скоростью  $0,9 \text{ мм/сек}$ .

По предположению одних авторов [5], горение алюминия протекает в газовой фазе, другие [6] предполагают, что горение алюминия протекает на поверхности частицы.

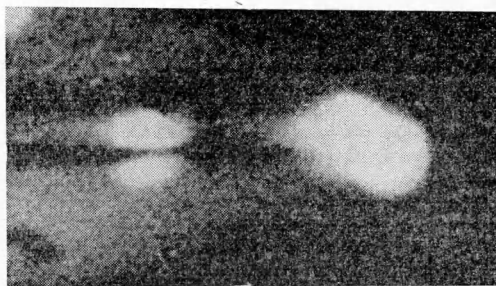


Рис. 3. Воспламенение частицы алюминия.

На основании анализа экспериментальных данных, полученных при изучении химического состава крупных частиц алюминия, образовавшихся из мелких частиц путем слияния при горении баллистических составов, можно заключить, что горение алюминия протекает одновременно на поверхности частиц и в газовой фазе.

Коэффициент линейного расширения алюминия  $\alpha_{Al} = 29 \cdot 10^{-6}$  в три раза больше коэффициента линейного расширения двуокиси алюминия  $\alpha_{Al_2O_3} = 8,7 \cdot 10^{-6}$  [7].

Используя данные по физико-механическим свойствам двуокиси алюминия [8], нетрудно показать, что уже при  $T=50^\circ\text{C}$  из-за различия в коэффициентах расширения  $Al$  и  $Al_2O_3$  окисная пленка, покрывающая алюминий, начинает растрескиваться. При нагревании пленка из  $Al_2O_3$  под давлением жидкого алюминия и его паров в ослабленных местах разрушается. Этим можно объяснить несимметричность пламени при воспламенении частиц алюминия. При  $T=2050^\circ\text{C}$  и выше окисная пленка становится жидкой и условия для проникновения жидкого алюминия на поверхность частицы облегчаются. Кроме того, через окисную пленку диффундирует пар алюминия, который сгорает (окисляется) вблизи поверхности частицы.

Поступила в редакцию  
5/V 1968

#### ЛИТЕРАТУРА

1. П. Ф. Похил. Сб. «Физика взрыва», № 2. М., 1953.
2. П. Ф. Похил. Докт. дисс. М., 1954.
3. Г. В. Самсонов, К. И. Портной. Сплавы на основе тугоплавких соединений. Оборонгиз, 1961.
4. Процессы горения. Под ред. Б. Льюис. М., ИЛ, 1961.
5. R. Friedman and A. Masek. Combustion Flam., 1962, 6, 9—19.
6. L. Brewer. Chem. Reviews, 1959, 52.
7. Handbook of Chemistry and Physics, 1951—1952.
8. Исследования при высоких температурах. Под ред. В. А. Кириллина. М., ИЛ, 1962.

УДК 532.501.32

#### ПРОХОЖДЕНИЕ РАДИОВОЛН ЧЕРЕЗ ОБЛАСТЬ ВЗРЫВА

В. А. Вельмин, Ю. А. Медведев, Б. М. Степанов

(Москва)

Исследование параметров различных процессов, сопровождающих взрыв, было проведено во многих работах. Но в настоящее время было бы весьма трудно предсказать характер взаимодействия радиоволн с областью взрыва и в силу этого при изучении, например, прохождения радиоволн через область взрыва можно ожидать получения дополнительной новой информации о процессах, протекающих во внутренних областях взрыва, недоступных для измерений другими средствами. В отличие от прочих методов, например зондового, метод просвечивания радиоволнами, являясь активным, в то же время не вносит сколько-нибудь заметных возмущений в распределение измеряемых параметров (слабое поле).

Ниже приводятся результаты экспериментального исследования особенностей прохождения радиоволн сантиметрового диапазона через нестационарную область взрыва.

В опытах заряды типа ТГ 50/50 [1] массой 52, 104 и 225 г подрывались между центрированными параболической передающей антенной (по уровню 0,5 ширина диаграммы направленности  $10^\circ$ ), непрерывно излучающей на длине волны  $\lambda=3,2$  см, и приемной, выполненной в виде диэлектрического фторопластового стержня (ширина диаграммы направленности  $35^\circ$ ). Расстояние между антеннами ( $2R$ ) составляло 230 см. Сигнал с приемной антенны после квадратичного детектирования регистрировался осциллографами С1-33 и ЭНО-1.

Типичная осциллограмма, зарегистрированная ЭНО-1, изображена на рис. 1. Масса заряда 225 г, интервал между метками времени 20 мксек. Верхний луч соответствую-