

ЛИТЕРАТУРА

1. В. Н. Виллюнов. Докл. АН СССР, 1961, 136, 2.
2. Л. Грин. Вопросы ракетной техники, 1954, 6.
3. Ж. Ванденкеркхове. Вопросы ракетной техники. 1959, 3.
4. Р. Герон. Вопросы ракетной техники, 1963, 6.
5. Зукроу, Осборн, Мэрфи. Ракетная техника и космонавтика, 1965, 3.
6. Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. Механика сплошных сред. ГИТЛ, 1954.
7. Я. Б. Зельдович. ЖФХ, 1948, 22, вып. 1.

УДК 536.46 + 662.222.4

ГОРЕНИЕ ЧАСТИЦ АЛЮМИНИЯ В ФАКЕЛЕ ПЛАМЕНИ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СИСТЕМ

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

В настоящей работе изучался процесс горения частиц алюминия в факеле пламени баллиститного пороха Н и модельной смеси перхлората аммония с органическим горючим. Исследование процесса горения частиц металла проводилось в бомбе постоянного давления с кварцевыми окнами, где в зависимости от требуемых условий создавался вакуум или необходимое давление инертного газа (азот, аргон). Частицы металла вводились в состав топлив в процессе изготовления. Для исследования процессов, протекающих на поверхности горения, использовался фотографический метод [1], а изучение размеров частиц металла по высоте факела пламени производилось методом отбора частиц. Излучение продуктов горения частиц металла и их температура горения исследовались с помощью спектрально-оптических методов [2]. Для этого использовалась спектрально-сканирующая установка, позволяющая регистрировать излучение продуктов горения частиц металла в видимой и ультрафиолетовой областях спектра со скоростью от 1 до 100 спектров в секунду [4]. Температура измерялась по распределению энергии излучения в видимой области спектра, по резонансным линиям алюминия и фотометрическим методом. Применение скоростной киносъемки позволяло измерять скорость движения частиц в факеле пламени, расстояние от поверхности горения топлив до места воспламенения.

Процессы, протекающие на поверхности горения топлива

Определенный интерес представляет исследование процессов, протекающих на поверхности горения топлив с добавкой металла, а также оценка влияния таких факторов, как давление, процент содержания и исходный размер частиц металла, на конечные размеры частиц в продуктах горения.

Для изучения структуры поверхности горения топлив был разработан кинематографический метод, обеспечивающий возможность съемки отдельных фаз быстротечных явлений и процессов. Сжигание образца проводилось в условиях бомбы постоянного давления (диапазон давлений от 10 мм рт. ст. до 40 атм). Поверхность горения фотографировалась кинокамерами «Конвас» и СКС под различными углами (до 45°C). Такое расположение камеры позволяет повысить контраст изображения, что

выявляет геометрические неоднородности поверхности горения. Поверхность освещалась с помощью мощного источника света.

В качестве объектов исследования были взяты: 1) баллиститный порошок Н с добавкой алюминия 2 и 10% и исходного размера меньше микрона. Как следует из фотографий, внесение алюминия в состав топлива приводит к его агломерации на поверхности горения, причем при повышении давления уменьшается размер образующихся агломератов металла. Так, при давлении 10 атм средний размер агломератов ~ 1 мк, а при давлении 40 атм средний размер агломератов ~ 250 мк (Н+2% Аl, исходный размер меньше микрона). Аналогичные результаты получены и для других композиций баллистита Н с добавкой алюминия.

Объясняется это явление тем, что с повышением давления увеличивается массовая скорость оттока газов от поверхности горения и соответственно уменьшается время пребывания частиц Аl на поверхности горения.

С другой стороны, увеличение процента содержания металла в топливе и его исходного размера приводит, как следует из табл. 1, к увеличению числа агломератов, и их размера.

Таблица 1

| Баллистит Н с добавкой Аl, % | Давление, атм | Средний размер агломерата, мк |
|------------------------------|---------------|-------------------------------|
| 2 (≤ 1 мк) | 20 | ~ 400 |
| 10 (≤ 1 мк) | 20 | ~ 1 |
| 10 (≤ 1 мк) | 30 | ~ 250 |
| 10 (40—70 мк) | 30 | ~ 400 |

Следует отметить, что явление агломерации (слипание и слияние) металлического горючего на поверхности заряда топлива впервые было обнаружено в 1962 г. в ИХФ АН СССР.

В настоящее время существуют две гипотезы о механизме образования агломератов алюминия на поверхности горения топлива: «теория столкновения» [5] и гипотеза агломерации металла путем его накопления на поверхности топлива [6]. Покадровый анализ кинограмм показал, что агломерация алюминия на поверхности горения как баллиститного, так и смешанного топлива осуществляется в основном его накоплением, хотя замечено также наличие роста агломератов алюминия путем столкновения движущихся по поверхности горения частиц металла, но в меньшей степени.

О тепловом эффекте в конденсированной фазе топлива

Беспламенное горение является начальной стадией горения порохов и осуществляется практически в изолированном виде в условиях вакуума. Устойчивость беспламенного горения обусловлена тепловым эффектом реакций, протекающих в реакционном слое конденсированной фазы [7].

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

Из результатов по самовоспламенению составов в вакууме следует: чтобы осуществить горение составов в вакууме ($p \sim 10^{-2}$ мм рт. ст.), необходимо образец перед поджиганием (от накаливаемой спирали) предварительно нагреть до такой температуры, когда количество тепла, выделяющегося за счет суммарно-экзотермического процесса разложения, протекающего в к-фазе, будет достаточным для обеспечения устойчивого горения составов в условиях вакуума.

Зная минимальную температуру предварительного подогрева T_0 состава и температуру на поверхности образца T_3 при беспламенном

горении, можно оценить тепловой эффект Q суммарно-экзотермического процесса в реакционном слое конденсированной фазы

$$Q \approx \bar{c}_p (T_s - T_0),$$

где \bar{c}_p — средняя теплоемкость вещества; T_s — температура в реакционном слое; T_0 — температура предварительного нагрева.

При беспламенном горении модельного состава наблюдается непрерывный рост температуры поверхности горения с увеличением концентрации металла и с уменьшением размера частиц, вводимых в состав топлива, что обусловлено увеличением количества тепла, выделяющегося в конденсированной фазе заряда за счет реакций окисления на поверхности частиц металла.

Доля тепла, выделяющегося в к-фазе за счет реакций окисления металла, растет с увеличением процента добавки и составляет 25% для алюминия от всего тепла, выделяющегося в конденсированной фазе топлива, причем в реакционном слое заряда реагирует 4—6% Al от всего количества введенного в топливо.

При беспламенном горении баллиститного пороха Н с добавкой алюминия температура поверхности остается такой же, как для состава пороха Н без добавки металла. В этом случае частицы алюминия воспламеняются и горят не на поверхности заряда, а в дымо-газовой зоне факела пламени вблизи поверхности.

Исследование изменения размеров частиц по высоте факела пламени

Для изучения процесса изменения размеров частиц по высоте факела пламени были проведены эксперименты с составом на основе перхлората аммония с полиформальдегидом и добавкой 7, 13, 20% частиц алюминия. Размер частиц варьировался. Частицы из факела пламени стбирались на определенном расстоянии от поверхности горения на металлических или стеклянные пластинки, и по результатам счетного анализа строились интегральные кривые весового распределения частиц.

Как видно из табл. 2, для всех составов с увеличением процента добавки металла размер частиц алюминия, образующихся в результате

Таблица 2

| Диаметр исходных частиц, мк | Давление, атм | Расстояние от поверхности заряда топлива, мм | | | | | | | | |
|-----------------------------|---------------|--|----|----|----|----|----|-----|-----|-----|
| | | 0,5 | | | 5 | | | 10 | | |
| | | Добавка алюминия в топливе, % | | | | | | | | |
| | | 7 | 13 | 20 | 7 | 13 | 20 | 7 | 3 | 20 |
| ≤1 | 1 | 26 | 23 | 31 | — | — | — | 20 | 23 | 24 |
| | 30 | 17 | 19 | 22 | 6 | 7 | 8 | 2 | 2,5 | 3,0 |
| 5÷10 | 1 | 33 | 42 | 48 | — | — | — | 28 | 32 | 35 |
| | 30 | 32 | 39 | 36 | 9 | 11 | 12 | 2,5 | 3 | 4 |
| АСД=1 | 1 | 48 | 51 | 54 | — | — | — | 34 | 37 | 40 |
| | 30 | 37 | 40 | 44 | 12 | 15 | 17 | 2,5 | 3,5 | 4,5 |

слияния, растет, причем чем выше дисперсность алюминия, введенного в состав, тем меньше среднемассовый размер образующихся частиц (при одной и той же концентрации алюминия в топливе).

Для выяснения влияния скорости горения на процесс слияния частиц алюминия на поверхности горения были проведены эксперименты

с изменением плотности образца топлива. При одном и том же давлении в зависимости от плотности заряда топлива можно было менять скорость горения ($u=5,8$ мм/сек; $\rho=1,69$ г/см³; $u=7,6$ мм/сек; $\rho=1,37$ г/см³). Оказалось, что с увеличением скорости горения среднемассовый размер частиц алюминия, отобранный на расстоянии 0,5 мм от поверхности горения, уменьшается от 32 до 21 мк.

Экспериментальные результаты о влиянии на процесс слияния частиц алюминия природы окислителя $KClO_4$ и NH_4ClO_4 и физико-химических свойств связок даны в табл. 3.

Таблица 3

| Вид топлива | Добавка Al, % | Давление, атм | | |
|--------------------------------------|---------------|---------------|-----|-----|
| | | 5 | 20 | 40 |
| H_4ClO_4 + карбоксилатный каучук | 10 | 48 | 41 | 32 |
| | 20 | 67 | 58 | 46 |
| H_4ClO_4 + полиформальдегид | 10 | 46 | 41 | 35 |
| | 20 | 51 | 47 | 42 |
| H_4ClO_4 + нафталин | 10 | 190 | 150 | 100 |
| | 20 | 300 | 240 | 180 |
| $H_4C O_4$ + углерод + 0,5% парафина | 10 | 210 | 180 | 110 |
| | 20 | 320 | 270 | 200 |
| $KClO_4$ + карбоксильный каучук | 10 | — | 34 | 21 |
| | 20 | — | 48 | 37 |
| H_4ClO_4 + полиформальдегид | 10 | — | 30 | 27 |
| | 20 | — | 36 | 31 |
| H_4ClO_4 + нафталин | 10 | — | 90 | 60 |
| | 20 | — | 150 | 105 |
| H_4ClO_4 + углерод + 0,5% парафина | 10 | — | 120 | 80 |
| | 20 | — | 170 | 130 |

Среднемассовый размер частиц алюминия, образующихся в результате слияния для составов, содержащих одинаковую связку, больше в том случае, когда в качестве окислителя используется перхлорат аммония (при одной и той же концентрации алюминия в составе топлива). Это, возможно, связано с тем, что модельные смесевые топлива, содержащие в качестве окислителя $KClO_4$, при одном и том же давлении горят с большей скоростью, чем топливо на основе NH_4ClO_4 .

Более сильное влияние на процесс слияния частиц алюминия оказывает вид связки. Как видно из табл. 3, размер частиц алюминия, образующихся в результате слияния на горячей поверхности составов, содержащие плавкие связки (полиформальдегид и т. д.), в три-четыре раза меньше, чем частицы алюминия, образующиеся при горении составов, содержащие неплавкие связки (нафталин, углерод).

Воспламенение, температура и зоны горения частиц алюминия в факеле пламени

Оценка температуры продуктов горения, при которой происходит воспламенение, была проведена по месту возникновения ярко светящегося факела вокруг частицы металла путем сопоставления распределения температуры по высоте факела и месту появления светящегося ореола частицы.

Воспламенение частиц алюминия по высоте факела пламени зависит от размера частиц. Это связано со временем прогрева частиц до температуры окружающей среды, которое, как известно, пропорционально d^2 .

Очевидно, чем больше размер частицы, тем больше потребуется времени для ее нагрева до температуры воспламенения. Поэтому мелкие частицы воспламеняются в факеле пламени вблизи поверхности заряда, когда достигается температура среды около 1000°C. Крупные частицы воспламеняются на больших расстояниях от поверхности горения. Если к фракции с крупными частицами добавить небольшой процент по весу мелких частиц алюминия, то воспламенение крупных частиц улучшается. Поджигающее действие мелких частиц обуславливается увеличением температуры продуктов горения, радиацией и непосредственным действием при соударении с крупными негорящими частицами.

Для выяснения спектрально-оптических свойств факела пламени и изучения процесса горения частиц металла в продуктах горения конденсированных систем был использован сканирующий монохроматор [4], позволяющий исследовать спектр излучения в диапазоне 0,281—1,1 мк. Спектральные исследования пламени металлизированных конденсированных систем при повышенных давлениях показали существование сплошного интенсивного спектра по высоте факела.

На фоне сплошного спектра выделяются электронноколебательные полосы AlH, AlO и резонансные линии Al. Появление интенсивных полос AlO в спектре изучения связано с тем, что сгорание алюминия в факеле пламени протекает через промежуточные продукты с образованием низших окислов.

Наличие сплошного спектра по высоте факела пламени в ближней ультрафиолетовой и видимой областях спектра объясняется излучением продуктов горения металла, образующихся в факеле пламени. В этом случае распределение интенсивности описывается формулой Вина

$$E_{\lambda, T} = \alpha_{\lambda, T} c_1 \lambda^{-5} l^{-\frac{c_2}{\lambda, T}},$$

т. е. полученные кривые по своему характеру идентичны спектру теплового излучения серого тела. Это говорит о том, что спектр по высоте факела пламени с добавкой алюминия обусловлен термическим излучением образующихся в результате горения частиц окислов Al_2O_3 . Температуру горящих частиц металла факела пламени можно оценить по распределению энергии в видимой области спектра с учетом излучения газообразных продуктов факела пламени.

В спектре факела пламени наблюдается серия резонансных линий алюминия 3944, 3961, 3092, 3082 Å. Известно [8], что атомарная температура T , энергия возбуждения E и вероятность переходов A этих линий связаны соотношением:

$$T = \frac{E_2 - E_1}{k} \left(\ln \frac{I_1}{I_{II}} + \ln \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \ln \frac{A_1}{A_{II}} \right),$$

где E_1 и E_2 — потенциал возбуждения; λ_1 и λ_2 — длина волны резонансных линий; A_1 и A_{II} — вероятность перехода.

При определении отношения интенсивности двух линий $\frac{I_1}{I_{II}}$ была оценена температура горения частиц алюминия с учетом самопоглощения. Спектральные оптические исследования факела пламени позволили выбрать определенные спектральные интервалы и применить для измерения температуры частиц фогометрический метод, что дает возможность локально разрешить форму и определить температуру факела пламени одиночных горящих частиц в продуктах горения.

Определение цветовой температуры фотографическим методом сводится к сравнению плотностей почернения, вызываемых действием исследуемого источника излучения в двух областях спектра.

Одним из основных требований, предъявляемых к регистрирующей части установки, является величина экспозиции, так как в случае большого времени экспозиции на фотоматериале будут наблюдаться треки летящих частиц. И в этом случае фотометрический метод, в основе которого лежит измерение абсолютной или относительной энергетической яркости объекта, становится непригодным.

Т а б л и ц а 4

| Состав | Метод | | |
|--|-------------------|-------------------|-----------------|
| | сплошного спектра | резонансных линий | фотометрический |
| Баллиститный порох (40—70 мк) | 3100 ± 150 | 3200 ± 150 | 3100 ± 150 |
| Перхлорат + полиформальдегид (10—20 мк) | 3500 ± 150 | 3700 ± 150 | 3700 ± 150 |

Ввиду необходимости получения малых времен экспозиции ($\tau = \frac{1}{2500} \div \frac{1}{5000}$) была разработана конструкция электромеханического затвора, который представляет собой сочетание механической части применяемой фотокамеры и вращающегося диска на синхронном моторе СД-09 с диафрагмирующим отверстием [9]. Одноразовость срабатывания затвора достигается с помощью электрической схемы на тиратронах. Конструкция электромеханического затвора обеспечивает высокую стабильность воспроизведения в широком диапазоне выдержек.

Для выяснения вопроса, какая область горячей частицы — поверхностно-жидкий слой или зона продуктов реакции, окружающая частицу, — ответственна за излучение, была проведена оценка прозрачности (коэффициентов черноты) в исследуемом спектральном интервале. Для определения коэффициентов черноты пламени одиночной горячей частицы она просвечивалась мощным источником излучения [10]. Полученные коэффициенты оказались значительно больше коэффициентов черноты газообразных продуктов горения, что можно объяснить образованием и существованием в зоне, окружающей частицу мельчайших конденсированных окислов Al_2O_3 , которые вместе с газообразными продуктами являются основными источниками теплового излучения горячей частицы.

В табл. 4 приведены результаты измерения температуры факела пламени горящих частиц алюминия различными методами. Следует отметить, что температура зоны горения частицы алюминия больше температуры факела пламени топлива на 400—600°C.

С помощью установки по отбору частиц металла в факеле пламени и фотокамеры с электромеханическим затвором была проведена оценка относительных размеров зоны горения частицы $h = \frac{r_{гор}}{r_{час}}$. Величина h в интервале $p = 10—60$ атм изменяется в пределах 1,6—1,4.

В результате проведенного экспериментального исследования установлено:

1. При горении баллиститного пороха Н с добавками алюминия на поверхности заряда происходит слипание частиц металла с термостойкими продуктами разложения нитроклетчатки и последующее их слипа-

ние вблизи поверхности заряда. В случае горения модельных смесевых систем слияние частиц алюминия происходит на поверхности заряда. Увеличение процента добавки металла в топливе ведет к росту размера частиц. На поверхности горения заряда происходит накопление частиц алюминия и их агломерация.

2. В начальной стадии горения модельных смесевых топлив с добавкой алюминия, т. е. в реакционном слое, на поверхности частиц металла начинают протекать реакции окисления металла с положительным тепловым эффектом, причем в реакционном слое выделяется 4—6% от всего тепла, реализующегося за счет сгорания металла в факеле пламени. Частицы металла в баллиститном порохе начинают реагировать в дымогазовой смеси вблизи поверхности заряда.

3. Сгорание частиц алюминия в факеле пламени протекает через промежуточные продукты с образованием низших окислов.

4. Температура зоны горения частицы алюминия превосходит температуру факела пламени на 400—600°C.

*Поступила в редакцию
24/II 1970*

ЛИТЕРАТУРА

1. П. Ф. Похил, В. С. Логачев, В. М. Мальцев, В. А. Селезнев. ФГВ, 1970, 6, 2.
2. П. Ф. Похил, В. С. Логачев, В. М. Мальцев. Тез. I Всес. симпозиума по горению и взрыву. М., «Наука», 1968.
3. П. Ф. Похил, В. М. Мальцев, В. М. Зайцев. Методы исследования процессов горения и детонации. М., «Наука», 1969.
4. П. Ф. Похил, В. М. Мальцев и др. Передовой научно-технический и производственный опыт ГОСИНТИ, № 18—66—713/43. М., 1966.
5. L. A. Rovinelli, R. A. Rosenstein. AIAAJ, 1965, 3, 9, 279.
6. H. Price. AIAAJ, 1965, 3, 9.
7. П. Ф. Похил. Докт. дисс. М., ИХФ АН СССР, 1953.
8. Н. П. Пенкин, Л. Н. Шабашов. Оптика и спектроскопия, 1963, 14, 1.
9. П. Ф. Похил, В. М. Мальцев и др. Матер. VII Межвуз. конф. по вопросам испарения, горения и газовой динамики дисперсных систем. Одесса, изд. ОГУ, 1967.
10. Н. Н. Огурцова, Н. М. Подмошенский. Оптика и спектроскопия, 1958, 4, 539.

УДК 536.46 + 662.222.2

ОБ АНОМАЛЬНОЙ ЗАВИСИМОСТИ СКОРОСТИ ГОРЕНИЯ ОТ ДАВЛЕНИЯ ДЛЯ СМЕСЕЙ ПЕРХЛОРАТА АММОНИЯ С НЕКОТОРЫМИ ОРГАНИЧЕСКИМИ ГОРЮЧИМИ

*В. И. Брагинский, Н. Н. Бахман
(Москва)*

Зависимость скорости горения u от давления p представляет большой интерес как для конденсированных, так и для газовых смесей. Вид зависимости $u(p)$ для конденсированных смесей может быть весьма различным. В работе [1] рассмотрено пять типов зависимости $u(p)$. Особый интерес с точки зрения теории горения вызывает случай, когда скорость горения с повышением давления возрастает до некоторого мак-