

В режиме неакустической неустойчивости частота колебаний давления в камере ω_n может быть приближенно найдена из соотношения (3)

$$1 = \operatorname{Re} \Phi(\omega_n). \quad (18)$$

В [17] в интервале давлений $1 \text{ атм} \leq p \leq 14 \text{ атм}$ исследовался порох с законом горения $u = 0,1 p^{0,5}$ (скорость в см/с, а давление в атм). Полагая $\kappa = 10^{-3} \text{ см}^2/\text{с}$, из данных [17] можно найти $\omega_a = 3,2$ и $\omega_n = 2,0$. Расчеты по формулам (17) и (18) приводят к вполне разумным величинам $k = 1,3$ и $r = 0,2$.

На основании изложенного можно сделать следующие выводы.

1. Теория нестационарных явлений [6—9] достаточно хорошо описывает явления акустической и неакустической неустойчивости.

2. Анализ акустической и неакустической неустойчивости позволяет определить параметры пороха $k = (T_1 - T_0) (\partial \ln u / \partial T_0)_p$ и $r = (\partial T_1 / \partial T_0)_p$, ошибка в измерении r таким способом гораздо меньше, чем при прямых определениях температуры поверхности в зависимости от начальной температуры.

3. Величина r для баллиститных порохов равна приближенно 0,2.

Поступила в редакцию
30/I 1970

ЛИТЕРАТУРА

1. А. А. Зенин. ФГВ, 1966, 2, 3.
2. А. А. Зенин, О. И. Нифедова. ФГВ, 1967, 3, 1.
3. В. В. Александров, Э. В. Конев и др. ФГВ, 1966, 2, 1.
4. В. К. Боболев, А. П. Глазкова и др. ПМТФ, 1964, 3.
5. I. Rowling, W. A. W. Smith. Combustion and Flame, 1963, 7, 3.
6. Б. В. Новожилов. ПМТФ, 1965, 6.
7. Б. В. Новожилов. ПМТФ, 1967, 1.
8. Б. В. Новожилов. ФГВ, 1967, 3, 1.
9. Б. В. Новожилов. ФГВ, 1968, 4, 4.
10. R. Sehgal, L. D. Strand. AIAA J., 1964, 2, 4. (Русский перевод: Ракетная техника и космонавтика, 1964, 4).
11. M. W. Beckettead, N. W. Ryan, A. D. Beag. AIAA J., 1966, 4, 9 (Русский перевод: Ракетная техника и космонавтика, 1966, 9).
12. Я. Б. Зельдович. ПМТФ, 1963, 1.
13. R. H. Cantrell, R. W. Hart. J. of the Acoustical Society of America, 1964, 36, 4.
14. С. С. Новиков, Ю. С. Рязанцев. ПМТФ, 1966, 2.
15. M. D. Horton, E. W. Price. 9-th Symposium (International) on Combustion, 1963.
16. Р. Н. Уимпресс. Внутренняя баллистика пороховых ракет. М., ИЛ, 1952.
17. I. L. Eisel, M. D. Horton a. o. AIAA J., 1964, 2, 7. (Русский перевод: Ракетная техника и космонавтика, 1964, 7).

УДК 536.46+662.612

О МЕХАНИЗМЕ ДЕЙСТВИЯ КАТАЛИТИЧЕСКИХ ДОБАВОК НА ПРОЦЕСС ГОРЕНИЯ БАЛЛИСТИЧНОГО ПОРОХА¹

B. M. Мальцев, M. Саммерфильд
(Москва)

Задача данной работы состояла в спектрально-оптическом исследовании факела пламени баллиститного топлива с каталитическими добавками и в выяснении механизма действия их в процессе горения. В на-

¹ Работа выполнена в лаборатории Принстонского университета США в 1971 г.

стоящее время в литературе имеется ограниченное количество работ, посвященных вопросу действия каталитических добавок на процесс горения баллиститного топлива [1—3].

В работе изучались следующие параметры процесса горения: спектральный состав продуктов горения по высоте факела пламени топлив с катализаторами, распределение температуры по высоте факела и структура зон горения в инфракрасной области спектра.

Объектами исследования являлись: баллиститный порох (39,2% нитроглицерина) с добавкой 1% PbSa (салицилат Pb), с добавкой 1% CuSa (салицилат Cu) и с добавкой 1% PbSa и 1% CuSa, а также порох без каталитических добавок. Дисперсность добавок 5 мк. Условия экспериментов: атмосфера азота, интервал изменения давления от 1 до 100 атм, комнатная температура.

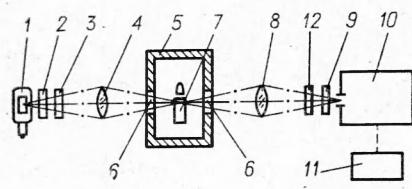


Рис. 1. Схема установки для спектрально-оптических исследований факела пламени баллиститного пороха в бомбе постоянного давления: 1 — ртутная лампа для калибровки спектра; 2 — диафрагма; 3 — нейтральные фильтры; 4, 8 — кварцевые линзы; 5 — бомба постоянного давления; 6 — образец твердого топлива; 9 — электромеханический затор; 10 — сканирующий спектрограф; 11 — механический привод для перемещения фотопластины; 12 — кварцевый поворотный механизм.

Для проведения исследования спектрально-оптических закономерностей факела пламени при горении в бомбе постоянного давления была использована установка, показанная на рис. 1.

Образец твердого баллиститного топлива помещался в бомбу постоянного давления и поджигался. Излучение факела пламени горящего образца через кварцевые окна с помощью линзы фокусировалось на входную щель дифракционного спектрографа — монохроматора. Установка могла производить измерение спектра излучения продуктов горения в трех независимых режимах. В условиях первого режима излучение факела пламени фокусируется на входную щель спектрографа и время экспонирования может задаваться электрозатвором.

С помощью оптического кварцевого поворотного механизма, позволяющего повернуть изображение фронта горения на 90° параллельно высоте щели, во втором режиме было возможным фиксировать спектр излучения по высоте факела пламени. В этом режиме предусмотрено движение фотоматериала в фокальной плоскости спектрографа с помощью механического привода.

В третьем режиме для оценки местоположения высвечивания излучающих продуктов горения по высоте факела пламени использовалось излучение ртутной лампы, помещенной за фронтом пламени. Перед экспериментом образец полностью перекрывал щель спектрографа и излучение ртутной лампы не попадало на щель. Появление резкой интенсивной линии ртути свидетельствовало о месте нахождения поверхности горения на фотопленке. В этом режиме также предусмотрено движение фотопластиинки. Исследование спектра излучения продуктов горения производилось в интервале 3200—9200 Å на фотоматериале различной спектральной чувствительности.

Исследования спектра излучения продуктов горения состава «А» без катализатора в бомбе постоянного давления показали, что на сплошном, частично непрерывном фоне существуют полосы продуктов горения CO (3242 Å), C₂ (3283 Å), N₂ (3371 Å), N₂ (6688 Å), NH (3752 Å), H₂O (6632 Å), H₂O (6922 Å) и т. д. Кроме указанных полос и линий на спектрограммах ярко обозначены линии излучения примесей Na, K в топливе.

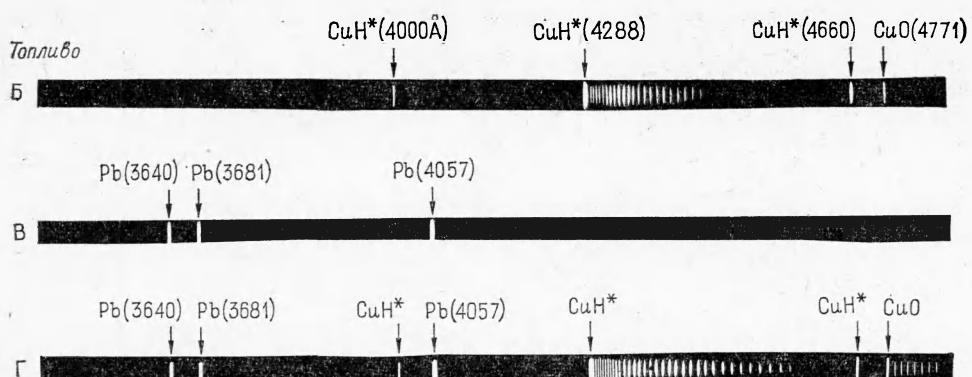


Рис. 2. Спектр излучения факела пламени составов «Б», «В», «Г» при давлении азота в бомбе 20 атм.

При горении топлива «Б», в который введен катализатор CuSa, кроме обнаруженных спектральных полос, характерных для состава «А», наблюдаются линии Cu (3146 Å), Cu (3994 Å), CuO (4771 Å) и интенсивные системы полос с резко выраженным максимумами и минимумами. Наиболее интенсивными системами являются CuH (3688—4000 Å), CuH (4004—4280 Å), CuH (4288—4661 Å) и CuH (4661 Å) (рис. 2, «Б»).

Эти интенсивные системы излучения продуктов катализитических реакций характеризуются большой протяженностью (от 200 до 800 Å) и строгими колебаниями интенсивности в каждой системе. Характерно постепенное убывание интенсивности обнаруженных систем излучения в сторону длинноволновой части спектра. В продуктах горения состава «В» с добавкой 1% PbSa кроме спектральных полос, характерных для состава без катализатора, обнаружены следующие полосы и линии: Pb (3639; 3683; 4057 Å), PbO (4249; 4553 Å) (рис. 2, «В»).

Следует отметить, что если для баллиститного топлива с добавкой 1% CuSa обнаруживается резкое изменение эмиссионного состава излучения и увеличение температуры продуктов горения, то для спектра излучения топлива с добавкой 1% PbSa наблюдается незначительное изменение спектра излучения и температуры факела пламени. В случае горения баллиститного состава с добавками 1% CuSa и 1% PbSa (топливо «Г») в спектре излучения продуктов горения наблюдаются все закономерности, свойственные спектру продуктов А, Б и В (рис. 2, «Г»).

Рассмотренные выше спектральные закономерности продуктов горения составов с добавками катализаторов позволили выбрать для оценки температуры факела пламени несколько спектральных областей, где отсутствуют интенсивные линии излучения продуктов катализитических реакций.

Распределение продуктов катализитических реакций по высоте факела пламени. Определенный интерес представляет вопрос об активной зоне действия катализической добавки во фронте горения (конденсированная фаза, дымогазовая и газовая зоны). Проведенные общие исследования спектра излучения топлив с катализаторами показали существование интенсивных полос продуктов катализитических реакций в определенных спектральных областях. В этих спектральных областях были проведены исследования распределения продуктов катализитических реакций по высоте факела пламени.

На рис. 3 даны спектрограммы высвечивания продуктов катализитических реакций по высоте факела пламени состава с 1% CuSa и 1% PbSa при различных давлениях. По результатам обработки спект-

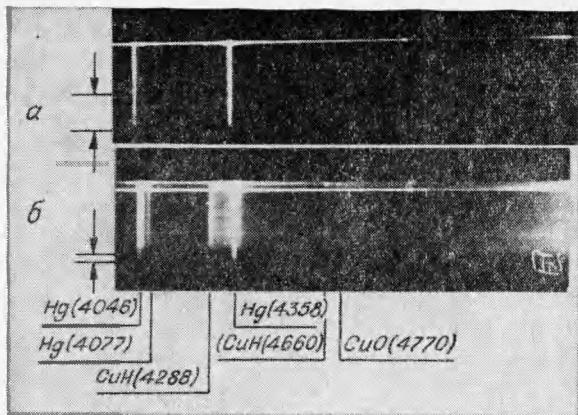


Рис. 3. Спектрограммы высыпчивания катализитических продуктов горения по высоте факела пламени состава «Г».
а) $p=10$ атм, $h \sim 5,3$ мм; б) $p=20$ атм, $h \sim 1,5$ мм.

пламени. Проведенные спектральные исследования позволили выбрать спектральные области, где возможно было поставить эксперименты по оценке максимальной температуры и распределения температуры по высоте факела пламени в интервале 1400—3000° К. Измерения температуры проводились в спектральных областях: $\Delta\lambda_1 = 5300—5100$ Å, $\Delta\lambda_2 = 6400—6200$ Å, $\Delta\lambda_3 = 7600—7400$ Å. Калибровка оптической системы сканирующего спектрографа производилась эталонной температурной лампой с учетом испускательной способности вольфрама в исследуемых спектральных областях. Поглощательная способность оценивалась просвечиванием факела пламени вольфрамовой лампой (рис. 4).

Увеличение внешнего давления приводит к росту температуры факела пламени. При давлении около 47 атм для баллиститного топлива без катализатора температура факела пламени принимает определенное максимальное значение, равное 2470° К, и не изменяется с ростом давления (точка « M_1 » на рис. 4). Для состава топлива с катализаторами существует значительный рост температуры факела пламени в области давления от 10 до 35 атм. Если для состава топлива без катализатора температура факела пламени при давлении 20 атм равна 2170° К, то для топлива «Г» она составляет 2360° К. Точка полноты сгорания сдвигается в область низких давлений (рис. 4, M_2).

На рис. 5 приведено распределение температуры по высоте факела для исследуемых составов при давлении 30 атм. Как видно из приведенных данных, температурный профиль состава «Г» расположен значительно выше температурных профилей остальных составов. Температурный профиль состава топлива с 1% CuSa (топливо «Б») занимает промежуточное положение между профилем состава топлива без катализатора и профилем состава «Г».

Внесение в состав топлива 1% PbSa не приводит к заметному изменению температурного распределения по высоте факела пламени.

Исследование зон горения баллиститных топлив в инф-

rogramm на денситометре было обнаружено, что начало высыпчивания CuH наблюдается вблизи поверхности горения (в дымогазовой зоне). Начало высыпчивания по высоте факела пламени продукта катализитической реакции с образованием CuH для давления 10 атмосфер наблюдается на расстоянии 5,3 мм, а для давления 20 атмосфер — на 1,5 мм от поверхности горения.

Оценка максимальной температуры горения и распределения температуры по высоте факела

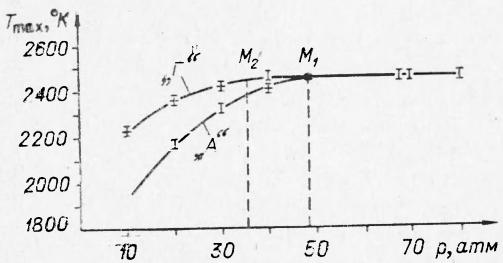


Рис. 4. Зависимость максимальной температуры факела пламени составов «А» и «Г» от давления.

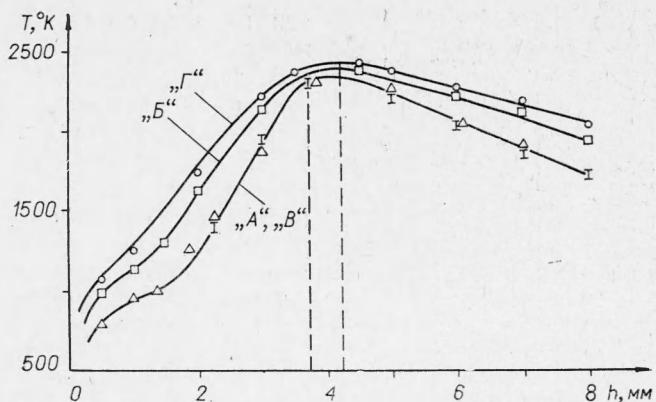


Рис. 5. Распределение температуры по высоте факела пламени при давлении 30 атм.

ракрасной области спектра. В данной работе исследование зон горения производилось в инфракрасной области спектра (8800—9200 Å) с тем, чтобы исключить неравновесное излучение продуктов каталитических реакций. Применялись инфракрасные светофильтры с узкой полосой пропускания. На рис. 6 приведены фотоснимки процесса горения состава топлива без катализатора (*a*) и состава топлива с 1% CuSa и 1% PbSa (*b*) при различных давлениях. На поверхности горения топлива отчетливо наблюдается накопление ярко светящихся частиц углерода, интенсивность свечения которых меняется в течение эксперимента и зависит от концентрации частиц на поверхности. Для состава топлива без катализатора характерно существование промежуточной несветящейся зоны между поверхностью горения и зоной максимальной температуры. При горении топлива с 1% CuSa и 1% PbSa интенсивность свечения промежуточной зоны возрастает.

Следует отметить, что если при фотографировании процесса горения топлива с катализаторами в видимой области на фотоматериале наблюдается «темная зона» (рис. 6, *a*), то при фотографировании этого же процесса в инфракрасной области спектра обнаруживается интенсивная по излучению переходная зона (рис. 6, *b*).

Рассматривая зависимость скорости горения от давления составов с катализаторами (рис. 7) и спектрально-оптические данные, ее можно условно разделить на четыре области.

Первая область (1—10 атм; наблюдается незначительное увеличение скорости горения для обоих катализаторов) характеризуется слабым проявлением факела пламени, значительными размерами зон горения.

Во второй области (10—30 атм; существует резкое увеличение относительной скоро-

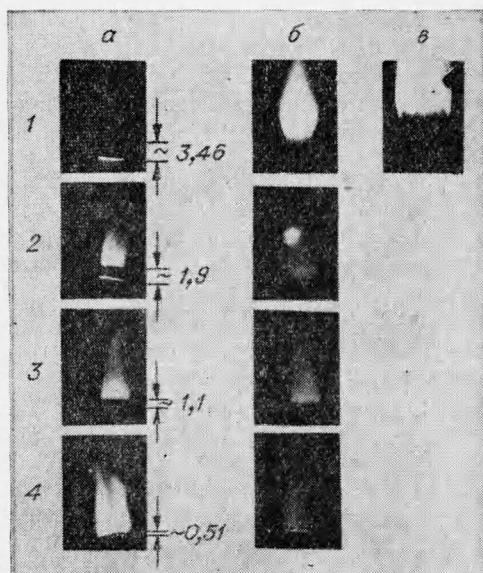


Рис. 6. Фотографии процессов горения в инфракрасной области спектра.
p, атм: 1 — 20; 2 — 30; 3 — 40; 4 — 70.

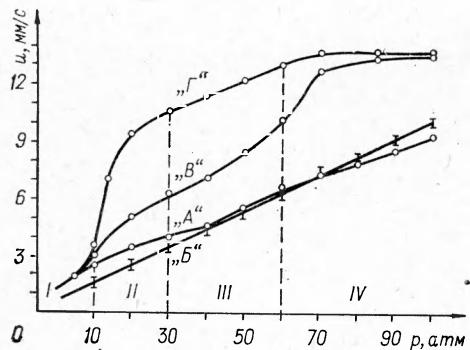


Рис. 7. Зависимость скорости горения исследуемых составов от давления.

Таким образом, оба катализатора увеличивают скорость горения, но ведут себя по-разному: CuSa значительно изменяет спектральные характеристики пламени и температуру горения, PbSa изменяет эти параметры несущественно.

Обращает на себя внимание тот факт, что интенсивное излучение основных продуктов каталитических реакций CuH, CuO наблюдается вблизи поверхности горения (при давлении 20 атмосфер на расстоянии 1,5 мм). Существенное изменение спектра излучения продуктов горения вблизи поверхности, увеличение температуры в «темной зоне» факела пламени свидетельствуют, что катализатор CuSa оказывает основное действие — увеличение скорости протекания химических реакций в дымогазовой и газовой зонах пламени.

Отсутствие существенных спектральных и температурных изменений в продуктах горения при введении в состав топлива катализатора PbSa (исключением является появление интенсивной линии Pb) объясняется интенсификацией химических реакций в конденсированной фазе топлива. Следовательно, PbSa может существенно ускорять химические реакции разложения и превращения твердой фазы топлива в жидкую и газообразную.

В связи с тем, что активное действие катализатора CuSa осуществляется в дымогазовой и газовой зонах факела пламени (появление каталитических продуктов химических реакций, резкое изменение температуры по высоте факела пламени), а катализатора PbSa в конденсированной фазе топлива (появление интенсивной линии Pb — у поверхности горения), их одновременное введение в состав топлива приводит к значительному увеличению скорости, что и нашло свое подтверждение в результатах по измерению зависимости скорости горения от давления.

В результате проведенных спектрально-оптических исследований состава продуктов горения баллиститных топлив с катализаторами PbSa и CuSa установлено:

1. Спектр излучения продуктов горения состава с катализатором CuSa резко отличается от спектра излучения состава с катализатором PbSa. Характерным является существование в спектре продуктов вблизи поверхности интенсивных спектральных линий продуктов каталитических реакций CuH.

2. Существенное изменение спектра излучения состава продуктов, увеличение температуры горения по высоте факела пламени свидетельствуют, что катализатор горения CuSa активное действие оказывает в дымогазовой и газовой зонах пламени.

сти горения) появляется факел пламени, значительно увеличивается температура, изменяется состав продуктов горения, а также уменьшаются зоны горения.

Для третьей области (30—60 атм; наблюдается плавный рост скорости горения) характерно незначительное изменение состава продуктов горения и незначительное изменение температуры факела пламени.

Четвертая область (60—100 атм; скорость горения не изменяется) отличается постоянством состава продуктов горения и температуры факела пламени.

3. Введение в состав топлива PbSa не приводит к заметному изменению температуры по высоте факела пламени и состава продуктов горения (за исключением линии Pb), что свидетельствует, что PbSa существенно ускоряет химические реакции разложения и превращения твердой фазы в газообразную на ранних стадиях горения (в конденсированной фазе).

4. Значительное увеличение скорости горения с введением 1% PbSa и 1% CuSa объясняется их одновременным активным действием в различных зонах горения баллиститного топлива.

*Поступила в редакцию
11/VII 1972*

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. R. F. Preckel. ARSJ., 1961, **31**, 9.
 2. I. Dauerman, Y. A. Tajime. AIAA J., 1968, **6**, 4.
 3. N. Kuboto. Combustion mechanism of Platouized Double — Base Propellants. PRe— general Seminar. November, 1971.
-