

*О. П. Коробейничев, А. Г. Терещенко, В. М. Шварцберг,
А. А. Чернов, А. Е. Заболотный, И. Д. Емельянов*

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ПЛАМЕНИ СЛОЕВЫХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ ПХА

Теоретический анализ горения смесевых твердых топлив затруднен из-за неоднородности и нестационарности самого процесса горения. Геометрическая упорядоченность расположения компонентов в слоевых системах, состоящих из чередующихся слоев окислителя и горючего, значительно упрощает изучение горения смесевых систем. Горение в этом случае проходит стационарно и в то же время пространственно неоднородно. Удовлетворительная модель горения слоевой системы, учитывающая газодинамические и химические процессы, позволит расчетным путем получить сведения о тепловых потоках в конденсированную фазу (к-фазу). От них, в свою очередь, можно перейти к локальным скоростям горения слоевой системы и далее к скоростям горения смесевого состава, включающего частицы окислителя с различной дисперсностью.

Изучение горения слоевых систем позволяет проанализировать влияние таких важных факторов для горения смесевых составов, как давление, наличие катализаторов и др. Поэтому эти системы рассматривались в [1—13], где экспериментально изучены форма поверхности горения, ее скорость, влияние на эти параметры толщины слоев и давления p . Отмечается важность знания структуры пламени для правильного понимания и исследования механизма горения. Однако только в работе [13] сделана попытка изучить химическую структуру слоевых систем на основе ПХА и ПММА, горящих при пониженных давлениях под действием падающего на поверхность горения светового потока аргонового лазера. В этой работе авторы, используя метод масс-спектрометрического зондирования пламен, привели данные по поперечному и продольному сканированию зон горения на расстояниях от поверхности, превышающих 1 мм.

В то же время основные, определяющие скорость горения процессы, протекающие на расстояниях < 1 мм от поверхности горения, в [13] не обнаружены. Несмотря на ряд недостатков методики, связанных с неопределенностью в координате местоположения пробоотборника относительно поверхности горения и трудностями анализа баланса тепла в зоне горения, данные [13] по профилям температуры и интенсивностей пиков масс газообразных компонентов при горении слоевой системы ПХА — ПММА представляют интерес как первый опыт получения качественных данных по химической структуре пламен слоевых систем на основе ПХА.

Тепловая структура волны горения слоевых систем на основе ПХА при $p = 5 \div 60$ атм исследовалась методом тонких термопар в [9], где зафиксирована двухзонная структура пламени в сечении, соответствующем середине слоя ПХА. Температура в пламени росла вблизи поверхности горения (на расстояниях 0,1—0,2 мм) до температуры горения чистого ПХА ($\sim 1000^\circ\text{C}$), затем возникла полочка, за которой температура увеличивалась до 2600°C . Эти данные косвенным образом подтвердили многопламенную модель горения СТТ Бекстеда — Дера — Прайса.

В настоящее время в литературе отсутствуют прямые (как качественные, так и количественные) данные по химической структуре зон горения слоевых систем на основе ПХА и полимерного связующего. Их знание позволит ответить на многие вопросы, связанные с формой горячей поверхности, скоростью горения и их зависимостью от условий эксперимента — давления, размеров слоев и т. д.

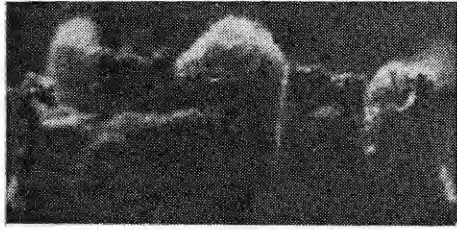


Рис. 1. Поверхность затушенного образца (темные слои — «основа», светлые — ПХА).

нено «основой» — смесью связующего-горючего с мелкодисперсным ПХА (размером единицы — десятки микрон). Поэтому наилучшим образом смесевые системы должны моделироваться слоевыми, состоящими из чередующихся слоев окислителя и «основы». Как показывает анализ литературных данных, такие системы, однако, до сих пор не рассматривались. Объектом проводившихся исследований, в том числе упомянутых выше, служили упрощенные слоевые системы, состоящие из чередующихся слоев окислителя и горючего-связующего.

Цель настоящей работы — изучение химической и тепловой структуры горения слоевой системы на основе ПХА и «основы», состоящей из полибутадиенового каучука (ПБК) и мелкодисперсного ПХА ($v_r = 0,3$ мм/с).

Образцы собирались из чередующихся между собой трех слоев окислителя и двух слоев «основы» и имели размеры $10 \times 6 \times 4,8$ мм. Такие образцы условно назывались трехслойными. Центральный слой окислителя — спрессованная таблетка толщиной 1,32 мм. Слой «основы» размером $1,1 \times 10 \times 6$ мм содержал в себе ПХА (≤ 50 мкм) и ПБК в соотношении 57,1 : 42,9 (по массе) и получался путем полимеризации в форме в течение 24 ч при $T = 100^\circ\text{C}$. Размеры, состав, число слоев выбирали с учетом следующих факторов:

1) поверхность затушенных образцов должна быть по возможности гладкой, без резких выступов пластины ПХА. Выступы затрудняют зондирование образца при горении и математический анализ результатов, а также препятствуют отражению реальной структуры поверхности горения смесевых составов;

2) полное соотношение горючего и окислителя должно составлять 16 : 84 (по массе), что соответствует смесевому составу, близкому к стехиометрическому, поэтому крайние слои окислителя имели толщину 0,66 мм, т. е. в 2 раза меньшую центрального.

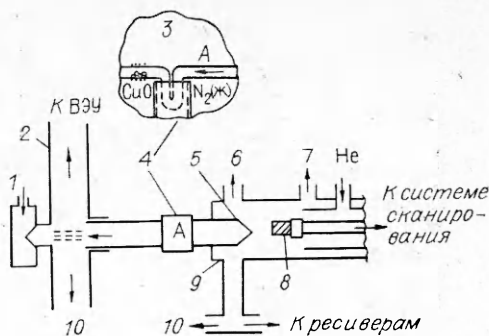
Химическая структура пламени исследовалась методом масс-спектрометрического зондирования пламен конденсированных систем [14, 15] в трех сечениях, соответствующих середине слоя ПХА, середине слоя «основы» и границе контакта окислитель — горючее. Образцы горели в токе гелия при $p = 2,6 \cdot 10^{-2}$ МПа. В качестве зонда использовали кварцевый конус с углом раствора $40-45^\circ$ и отверстием при вершине $15-20$ мкм, диаметр кончика зонда составлял 0,45 мм. Распределение температуры в волне горения измерялось с помощью П-образных микротермопар, сваренных из платиновой и платинородиевой проволочек диаметром 20 мкм и вольфрам-ренийевых диаметром 30 мкм. Поверхность термопар покрывалась слоем SiO_2 для защиты от каталитических реакций.

Для изучения структуры поверхности горения и формы слоев окислителя и «основы» образцы тушили методом резкого сброса давления (рис. 1). При исследовании продуктов горения смесевых составов и «сэндвичей» возникали большие трудности, связанные с анализом смеси газов $\text{CO} + \text{N}_2 + \text{CO}_2 + \text{N}_2\text{O} + \text{NO}$ с помощью времяпролетного масс-спектрометра, имеющего низкое разрешение.

Для решения этой задачи разработан и использован следующий метод. Схема экспериментальной установки для его осуществления изображена на рис. 2. Пробу, отобранную в высоковакуумную камеру времяпролетного масс-спектрометра с помощью кварцевого пробоотборника, сначала пропускали через ловушку, охлажденную жидким азотом, где вымораживаются все продукты сгорания образца, кроме CO , N_2 , H_2 и ча-

Рис. 2. Схема установки.

1 — подача аргона; 2 — камера; 3 — печь; 4 — ловушка; 5 — пробоотборник; 6 — тушение; 7 — газовый стэнд; 8 — образец; 9 — реактор; 10 — откачка.



стично NO. Затем пробу направляли в трубу, заполненную пористым твердым реагентом — окислителем (оксид меди), нагретым до 600 °С. При этом CO окисляется до CO₂. Пробу, в составе которой теперь присутствовали CO₂, CO, N₂, NO, направляли на анализ в ионный источник масс-спектрометра. По интенсивности пика с $m/e = 44$ (I_{44}) молекулярного иона CO₂⁺ определялось содержание CO и N₂ по следующим формулам:

$$I_{CO} = f_1 I_{44}^o, \quad I_{N_2} = I_{28}^o - f_2 I_{44}^o,$$

где I_{CO} и I_{N_2} — расчетные интенсивности пиков CO и N₂ для пробы газовой смеси; I_{28}^o , I_{44}^o — экспериментально полученные интенсивности пиков при применении методики; коэффициенты f_1 , f_2 получались при калибровке реагента окисью углерода. Для этого в реактор напускали окись углерода при определенном давлении. Полученный при этом масс-спектр регистрировался. Зависимость от давления интенсивностей пиков с $m/e = 28, 44$, как и следовало ожидать, прямолинейная. Тогда f_1 и f_2 определяются по наклону прямых, полученных при калибровке:

$$f_1 = \frac{\operatorname{tg} \alpha (J_{28}^K)}{\operatorname{tg} \alpha (I_{44}^K)}, \quad f_2 = \frac{\operatorname{tg} \alpha (I_{28}^K)}{\operatorname{tg} \alpha (I_{44}^K)}.$$

Здесь $\alpha (J_{28}^K)$ — угол наклона калибровочной кривой зависимости интенсивности пика с $m/e = 28$ от давления в реакторе при комнатной температуре реагента; $\alpha (I_{28}^K)$, $\alpha (I_{44}^K)$ — углы наклона кривых зависимости интенсивностей пиков с $m/e = 28, 44$ от давления в реакторе при температуре реагента 600 °С. Таким образом, содержание азота C_{N_2} и окиси углерода C_{CO} в пробе можно определить из соотношений

$$C_{N_2} = \frac{K_{N_2} I_{N_2}}{K_{N_2} I_{N_2} + K_{CO} I_{CO}} \cdot 100\%, \\ C_{CO} = 100\% - C_{N_2},$$

где K_{N_2} и K_{CO} — коэффициенты чувствительности N₂ и CO, получаемые при калибровке по чистым газам.

При применении этой методики для быстропротекающих процессов, к которым относится горение конденсированных систем, возникает вопрос о временной инерционности отклика реагента при быстром изменении содержания CO в пробе. Время задержки реагирования окислителя при мгновенном изменении концентрации CO от 0 до 90 % и более составляло <0,045 с, что давало пространственную погрешность <1,45 мкм.

Для определения концентрации компонентов в пламени выполнены три серии экспериментов: в первой (основной) опыты проводились без реагента и без вымораживания; во второй — без реагента, но с вымораживанием; в третьей — с нагретым реагентом и с вымораживанием. Во второй серии регистрировались пики масс, соответствующие H₂, CO, N₂, NO. В третьей находилось соотношение между CO и N₂. Полученные уравнения позволили расшифровать масс-спектр по оксидам азота и углерода.

Определение мольной доли компонента связано с коэффициентами чувствительности K . Они уточнялись при составлении уравнений балан-

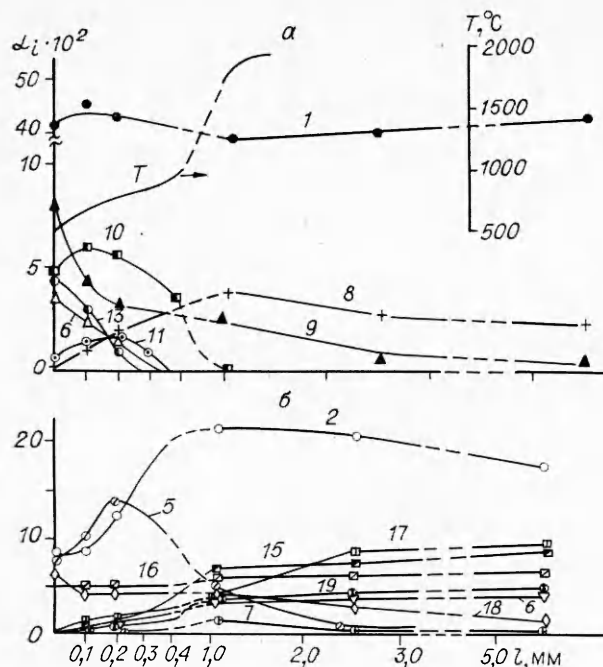


Рис. 3. Профили мольных долей компонентов и температуры в пламени слоевой системы, соответствующие середине слоя окислителя (ПХА).
 1 — H_2O ; 2 — HCl ; 3 — $CO + N_2$; 4 — $CO_2 + N_2O$; 5 — O_2 ; 6 — HCN ; 7 — C_2H_2 ; 8 — NO ; 9 — NH_3 ; 10 — NO_2 ; 11 — $ClOH$; 12 — NH_3 ; 13 — $HClO$; 14 — ClO_2 ; 15 — C_4H_6 ; 16 — CO ; 17 — CO_2 ; 18 — N_2O ; 19 — H_2 .

са в продуктах сгорания смесевых составов и их решении относительно K_i . Это позволило найти K_{H_2O} и K_{HCN} , калибровки по которым связаны со значительными трудностями.

В пламени слоевых систем обнаружены следующие компоненты: H_2 , NH_3 , H_2O , C_2H_2 , HCN , CO , N_2 , NO , HCl , CO_2 , N_2O , NO_2 , $ClOH$, C_4H_6 , ClO_2 , Cl_2 , профили мольных долей

которых и температуры представлены на рис. 3, 4. Анализ полученных данных показывает, что существуют две зоны в пламени слоевой системы в сечении, соответствующем середине слоя ПХА (рис. 3). Первой к поверхности горения ПХА примыкает узкая (около 0,2—0,3 мм) зона пламени ПХА, в которой происходит окисление хлорной кислотой аммиака с образованием NO , O_2 и других веществ. Химическая структура этой зоны практически та же, что и химическая структура пламени ПХА при $T_n = 270^\circ C$ и $p = 0,6$ атм. Ширины зон отличаются в 2 раза (т. е. в отношении давлений). Во второй, более широкой (около 3 мм) зоне расходуются O_2 и NO , а также накапливаются цианистый водород и ацетилен. Этот процесс обусловлен направлением указанных компонентов из соседних слоев перпендикулярно направлению газового потока. Кислород и окись азота расходуются в реакциях окисления окиси углерода с образованием CO_2 и N_2 . HCN , C_2H_2 , H_2 не окисляются. Опыты показали, что начиная с 5 мм от поверхности образца изменения концентраций CO и N_2 не происходят. Элементарная оценка длины диффузионного перемешивания по формуле $L \approx l_0^2/D \cdot v$ (l_0 — средняя ширина слоев, D — коэффициент молекулярной диффузии, v — скорость газового потока) показывает, что $L \approx 10$ мм. Визуальные наблюдения также показали наличие струй, отходящих от поверхности окислителя и «основы». На расстоянии 8—10 мм они сливаются. В то же время горючие компоненты «основы» HCN , C_2H_2 , по данным масс-спектро-

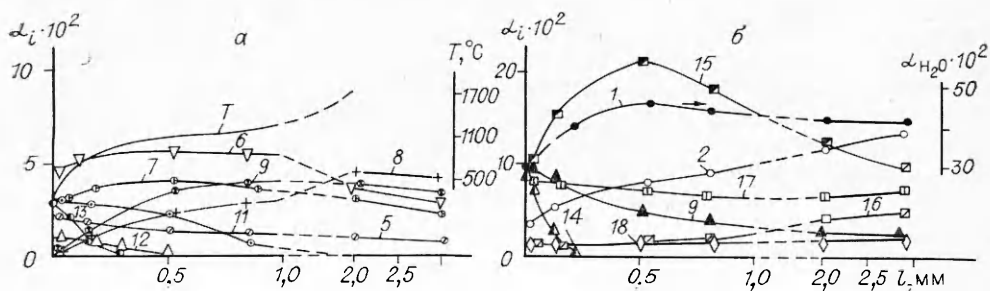


Рис. 4. Профили мольных долей компонентов и температуры в пламени слоевой системы, соответствующие середине слоя «основы» (обозначения см. на рис. 3).

метрического анализа, проникали вплоть до поверхности окислителя. Наличие продуктов разложения «основы» в зоне горения окислителя не может быть объяснено их диффузией из зоны полного диффузионного смешения. Имеющееся противоречие разрешимо, если рассмотреть профиль затупленной поверхности. Выступающая часть слоя создает особое условие для газодинамических потоков. В результате чего окислитель обдувается продуктами сгорания «основы».

Наличие второй зоны можно объяснить поперечной диффузией и медленной кинетикой окисления кислородом углеводородов (по сравнению с кинетикой в первой зоне окисления аммиака хлорной кислотой). Конкуренция в реакции окисления между аммиаком и углеводородами, включая СО и Н₂, не позволяет аммиаку полностью прореагировать в первой зоне, как происходит в пламени чистого ПХА.

На рис. 4 представлены профили мольных долей компонентов и температуры в пламени слоевой системы в сечении, соответствующем середине слоя «основы». В этих опытах также зафиксированы две зоны пламени:

1) узкая (~0,3 мм) зона расходования двуокиси хлора и хлорной кислоты, где окисляется некоторая часть аммиака, меньшая по сравнению с находящейся в узкой зоне пламени ПХА;

2) более широкая (~2—3 мм) зона дальнейшего расходования аммиака и накопления окиси азота. Концентрация кислорода примерно в 10 раз меньше, а концентрация HCN и C₂H₂ больше, чем в сечении, соответствующем середине слоя ПХА. Анализ данных показывает, что и при горении «основы» определяющую роль в пламени играют реакции окисления аммиака хлорной кислотой. Некоторая часть хлорной кислоты расходуется на реакции окисления углеводородов и углерода.

Получены результаты масс-спектрометрического зондирования пламени слоевой системы в сечении, соответствующем границе контакта слоя основы и слоя ПХА. Характер изменения концентраций компонентов такой же, что и в других сечениях. Некоторые колебания концентраций компонентов возможны не только за счет диффузии, но и из-за неточного «попадания» между слоями. В отличие от масс-спектрометрических данных анализ тепловой структуры сэндвича показал отсутствие четкой двухстадийности, наблюдавшейся при исследовании слоевых систем при высоких давлениях другими авторами, что, вероятно, связано с пространственной близостью тепловыделения от двух зон при низких давлениях.

Вторая зона при этом оказывает существенное влияние на процессы в первой. Очевидно, увеличением размера слоя ПХА можно добиться разрешения этих зон. Однако такая слоевая система менее точно моделировала бы горение смеси системы. Наличие у поверхности ПХА газообразного горючего (продуктов разложения «основы») показывают результаты масс-спектрометрического зондирования. Эти продукты могут вступать во взаимодействие с ПХА, что послужит дополнительным источником тепловыделения на поверхности горения. Возможность такого взаимодействия подтверждается результатами работы [16], в которой исследовался процесс разложения ПХА в присутствии газообразного пропилена.

Приведенные данные — необходимая основа для создания математической модели горения слоевой системы. В свою очередь, как указывалось выше, это является промежуточным этапом на пути создания модели горения смесевых составов, наиболее полно учитывающей реальные процессы при их горении.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ермолаев Б. С., Коротков А. И., Фролов Ю. В. ФГВ. 1970, 6, 3, 277.
2. Бахман П. П. // Ракетные топлива.— М.: Мир, 1975.
3. Нахбар В. // Исследование ракетных двигателей на твердом топливе.— М.: ИЛ, 1963.

4. Прайс Е. В. и др. РТК, 1981, 19, 4, 113.
5. Аликеев В. И., Коробейничев О. П., Шмелев А. С. ФГВ, 1979, 15, 2, 80.
6. Varney A. M., Strahle W. C. Comb. Sci. Technol., 1972, 4, 6, 197.
7. Boggs T. L., Zurn O. E. // Ibid.
8. Морфи Д. Л., Нетцер Д. В. РТК, 1974, 12, 1, 15.
9. Фролов Ю. В., Зенин А. А., Яковлев В. П. ФГВ, 1969, 5, 4, 544.
10. Handley J. S., Strahle W. C. AIAA Paper, 1974, N 74—122.
11. Штрале В. С. РТК, 1975, 13, 5, 128.
12. Bakhman N. N., Librovich V. B. Comb. Flames, 1970, 15, 2, 143.
13. Hertzberg M. Oxid. Comb. Revs., 1971, 1, 1.
14. Коробейничев О. П., Терещенко А. Г. Докл. АН СССР, 1976, 231, 5, 1159.
15. Коробейничев О. П., Куйбида Л. В. и др. // Масс-спектрометрия и химическая кинетика.— М.: Наука, 1985.
16. Inami S. H., Ragapakse Y. S., Wise H. Comb. Flames, 1971, 17, 2, 189.

г. Новосибирск

Поступила в редакцию 19/1 1989

УДК 621.452.3

С. Н. Черешин

ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ В КАМЕРАХ СГОРАНИЯ РЕАКТИВНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Эффективная работа реактивных двигателей и других энергетических агрегатов во многом зависит от того, как организован процесс сжигания топлива в камерах сгорания. Один из важных аспектов процесса горения — электрофизические явления. Выявлению их роли в камере сгорания и посвящена данная работа.

Экспериментальная установка состоит из металлической камеры сгорания диаметром 100 мм, системы подачи и дозировки компонентов, позволяющей варьировать входные параметры в широком диапазоне, систем зажигания (ЛУН 2273.02), измерительных устройств и охлаждения. Подача компонентов контролировалась манометрами, редукторами и ротаметрами. Топливо (пропан-бутан) подается из баллонов в смесительный блок камеры сгорания. Предварительно перемешанная смесь поступает через форсуночный блок (набор сеток) в камеру, где поджигается авиационной свечой. Для предотвращения прогара стенок непрерывно ведется охлаждение камеры проточной водой. Для измерения температур по сечению камеры сгорания располагались термопары хромель-алюмелевые с диаметром спая 1 мм. Спай термопары был открыт, а провода помещены в двухканальную керамическую трубку диаметром 2 мм и защитный металлический стакан.

Электрический потенциал ϕ измерялся пассивным зондом (без наложения внешней ЭДС) — керамическая трубка с вставленной в нее нихромовой проволокой диаметром 0,1 мм. Из технических соображений и для исключения влияния помех зонд помещался в металлический экран (трубка с внешним диаметром 4 мм и внутренним диаметром, равным диаметру керамической трубки), являющийся несущей конструкцией зонда. Относительная ошибка измерений не превышала 2%. Для упрощения схемы измерения электрического потенциала пассивным зондом была одна из проволок термопары. Выходные сигналы с датчиков поступали на вход усилителя постоянного тока и далее на самопишущие приборы.

Ввиду большого сопротивления источника сигнала использовали усилители с высокоомным входом. По результатам экспериментов построенные профили температур и электрических потенциалов при различных коэффициентах избытка окислителя α . Из рис. 1 видно, что пламя в камере сгорания имеет электрическое поле сложной структуры, причем конфигурация его зависит от входных параметров, в основном от соотноше-