

О МЕХАНИЗМЕ ДЕЙСТВИЯ ЖЕЛЕЗОСОДЕРЖАЩИХ КАТАЛИТИЧЕСКИХ ДОБАВОК НА ГОРЕНИЕ СМЕСЕВЫХ СИСТЕМ

*В. К. Боболев, М. Я. Ген, В. М. Мальцев, Г. П. Мелесов,
П. Ф. Похил, В. А. Селезнев, А. Н. Стасенко, С. В. Чуйко
(Москва)*

Введение каталитических добавок в конденсированные системы является наиболее распространенным приемом регулирования скорости и закона их горения. В настоящее время подбор эффективных добавок — катализаторов горения — основан на использовании богатого эмпирического материала и практически ведется методом проб. Исследование механизма действия каталитических добавок следует рассматривать как одну из нерешенных проблем теории горения.

Среди многочисленных катализаторов горения смесевых систем типа горючее — окислитель высокую эффективность проявляют соединения железа [1—3]. В сопоставимых условиях активность этих соединений в отношении систем на основе перхлората аммония (ПХА) оказывается одного порядка величины. В данной работе впервые рассматривается вопрос о носителях каталитической активности железосодержащих добавок, действующих в реакционной зоне горения смесевой системы.

Исходные компоненты и смеси

Исследование проведено на примере стехиометрической смеси ПХА и полиметилметакрилата (ПММА). Использовался ПХА с размером частиц менее 315 мк (смесь фракций) и ПММА с размером частиц 3 мк. С точки зрения достижения высоких коэффициентов увеличения скорости горения при введении каталитических добавок применение стехиометрической смеси является наименее неблагоприятным, поскольку такая система в наименьшей степени поддается воздействию катализаторов (см., например, [2]). Однако применять смеси нестехиометрического состава представлялось на данном этапе работы излишним усложняющим моментом ввиду появления в этом случае в зоне реакции избытка полупродуктов разложения преобладающего компонента.

В качестве каталитических добавок служили:

а) кристаллическое субдисперсное α -железо (кубические решетки, параметр $a = 2,87 \text{ \AA}$, примесь 0,2%-ной фазы Fe_3C), средний размер частиц $\sim 500 \text{ \AA}$. Метод получения описан в [4];

б) окись железа Fe_2O_3 , содержащая $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ (гексагональная решетка, параметры $a = 5,029 \text{ \AA}$, $c = 13,73 \text{ \AA}$, примесь $\sim 0,5\%$ γ -железа с параметром $a = 3,637 \text{ \AA}$), размер частиц — менее 5 мк;

в) ферроцен кристаллический, размер частиц менее 50 мк. При определении скорости горения смеси запрессовывали до плотности $1,78 \text{ г/см}^3$ в трубочки из ПММА с внутренним диаметром 7 и высотой 35 мм. Для спектрально-оптических измерений готовили таблетки прямоугольного сечения $10 \times 10 \text{ мм}$. Плотность этих образцов составляла $\sim 1,67 \text{ г/см}^3$. Добавки вводили сверх 100% в количестве 1 вес. %.

Введем обозначения смесей: базовая смесь ПХА + ПММА обозначим как смесь А, а ту же смесь с добавками 1 вес. % Fe, Fe_2O_3 и ферроцена обозначим соответственно как смеси А + Fe, А + Fe_2O_3 и А + ф.

Методы исследования

Скорость горения смесей определяли в боме объемом 2,5 л в атмосфере азота с регистрацией времени горения посредством записи кривой изменения (менее 5%) давления в объеме сгорания, вызванного горением образца. Дериватографический анализ смесей и компонентов в неизотермических условиях проводился на приборе фирмы «МОМ» (ВНР). Регистрировались одновременно кривые дифференциально-термического анализа (ДТА), термографического (ТГ), дифференциально-термографического (ДТГ), а также температура образца (T). В этих экспериментах применялись порошкообразные образцы без дополнительного уплотнения. Анализ проводили в токе азота или гелия в корундовых тиглях при линейной скорости нагрева 6 град/мин и массе образца, равной 50 мг.

Для определения температуры поверхности горения составов в работе был применен спектрально-оптический метод [5]. Этот метод основан на оценке излучения от реакционного слоя и дымо-газовой зоны пламени в определенном интервале длин волн с помощью светопровода, помещенного в толщу исследуемого образца на определенную глубину. Исследуемое излучение по светопроводу попадает на входную щель сканирующего монохроматора с последующей регистрацией. Этот метод принципиально отличается от известных тем, что светопровод получает информацию о реакционном слое на таких расстояниях от поверхности горения, на которых полностью исключается взаимодействие материала светопровода с прогретым и реакционным слоями исследуемого вещества.

Для регистрации распределения температур по высоте факела пламени в работе была применена спектрально-оптическая установка, позволяющая проводить измерения в широком интервале длин волн [6]. С помощью спектральных методов были выбраны участки спектра, не содержащие молекулярных и резонансных линий.

Исследование спектра, образующегося при горении, производилось двумя спектральными методами — фотографическим и фотоэлектрическим. Фотографический метод наиболее полезен для получения общей картины спектра и при его идентификации. Фотоэлектрический метод применялся в основном для количественных измерений интенсивности спектра. В работе использовались спектрограф ИСП-51 (рабочий диапазон 3600—10 000 Å), спектрограф ИСП-28 (рабочий диапазон 2000—6000 Å) и сканирующий монохроматор [8].

Результаты экспериментов

Скорость горения смесей. Результаты определения скорости горения смесей в зависимости от давления показывают, что в данных условиях в изученном интервале давлений все добавки увеличивают скорость горения на 20—40%. При этом наибольшее увеличение скорости горения дает введение Fe_2O_3 , а эффект добавки Fe и ферроцена оказался на 5—10% меньше. Введение катализаторов привело также к изменению закона зависимости скорости горения от давления $u = Bp^n$, что иллюстрирует табл. 1. Данные по смесям А и А+ Fe_2O_3 согласуются с результатами исследования [2].

Из табл. 1 следует, что эффективность действия всех добавок на скорость горения при увеличении давления возрастает, что приводит к усилению зависимости скорости горения от давления.

Дериватографический анализ. Исследование реакции компонентов смеси и их комбинаций на неизотермический нагрев позволяет получить определенную информацию о поведении вещества в конденсированной фазе.

Разложение ПХА протекает в две отчетливо выраженные стадии. Низкотемпературная стадия: начало 285°С, конец 385°С. Убыль веса 335°С около 13%; реакция идет с суммарным выделением тепла менее 2 ккал/моль. Высокотемпературная стадия: начало 335°С, максимум при 415°С. По сравнению с первым пиком скорость распада в максимуме возрастает в 12 раз, примерно так же растет максимальная амплитуда разогрева навески.

Таблица 1

Смесь	Диапазон давлений, ата	Показатели	
		<i>B</i>	<i>v</i>
А	3—16	1,0	0,52
	16—60	1,9	0,29
А + Fe	3—16	0,92	0,6
	16—40	1,6	0,42
	40—80	1,0	0,55
А + ф	3—16	1,17	0,54
	16—70	1,70	0,41
А + Fe ₂ O ₃	3—20	1,2	0,52
	20—70	1,55	0,45

Разложение ПММА (собственно деструкция полимера) начинается при 330°С и протекает эндотермически. Максимум скорости распада 375°С. К 330°С навеска теряет около 8% веса в основном за счет улетучивания примесей мономера.

Распад смеси А начинается сразу после температуры фазового перехода ПХА (250°С), согласно кривым ДТГ, в четыре стадии, которые в первом приближении можно разделить на две пары. Распад идет суммарно экзотермически на всех стадиях (выше 250°). Первая область тепловыделения лежит между 285 и 355°С, потери веса к 285 и 355°С составляют около 9 и

24% соответственно. Вторая область тепловыделения имеет интервал 385—430°С и начинается при потере веса, равной 27%.

Таким образом, дериватограмма смеси А в области температур выше 285°С представляет собой практически сумму эффектов разложения компонентов, тогда как при 250—285°С взаимодействие продуктов распада ПХА и ПММА приводит к ускорению потери веса.

Введение окиси железа (смесь А + Fe₂O₃) и ферроцена (смесь А + ф) привело к некоторому изменению структуры кривых ДТА и ДТГ при температурах выше ~200 и ~350°С соответственно. В частности, распад А + Fe₂O₃ (рис. 1) проходит в три стадии (максимумы скоростей при 285, 362 и 400°С).

Смесь А + Fe начинает распадаться сразу после фазового перехода ПХА с ускорением, и при 270°С происходит вспышка навески. В дополнительных экспериментах было установлено, что добавки Fe как к ПММА, так и к ПХА на разложение при температурах до 300°С не действуют. В табл. 2 приведены значения потери веса к температуре 280°С для компонентов и самой смеси А + Fe.

Таким образом, результаты дериватографического анализа указывают на весьма сильное ускорение взаимодействия **продуктов распада** ПХА и ПММА при введении железа. Необходимо сразу подчеркнуть, что из результатов данного анализа нельзя сделать однозначного вывода о том, что активной каталитической формой является чистое железо, поскольку в процессе взаимодействия с ПХА и ПММА оно может переходить в новые формы. С другой стороны,

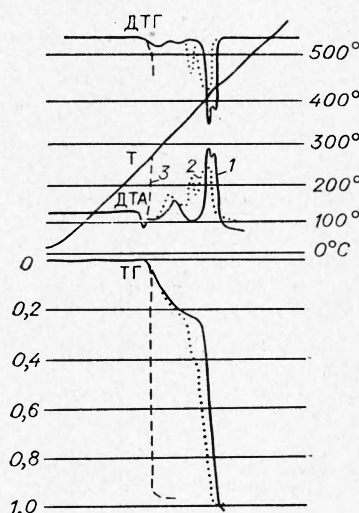


Рис. 1. Дериватограммы смесей.

1 — А; 2 — А + Fe₂O₃; 3 — А + Fe.

слабое влияние добавки Fe_2O_3 на распад смеси позволяет заключить, что если железо и претерпевает превращения, то оно переходит не в Fe_2O_3 . Следует учесть, что ввиду высокой летучести ферроцена его содержание в навеске непрерывно уменьшалось по мере нагрева. Поскольку ферроцен не распадается до температур порядка 470°C , его влияние на разложение смеси $\text{A} + \text{ф}$ представляется многостадийным, включающим стадию разрушения молекулы ферроцена продуктами распада ПХА.

Нагрев образца в условиях дериватографического анализа идет со скоростью порядка $2 \div 10$ град/мин, тогда как в волне горения эта скорость на 4—6 порядков выше. Это обстоятельство весьма важно и в некоторых случаях может изменить детали картины. Однако при достаточно сильной зависимости скорости химических реакций от температуры сдвиг (увеличение) характерных температур разложения по порядку величины составит $\Delta T \sim$

$\sim RT_0^2 / \epsilon$, где T_0 — характерная температура (например, разложение) в условиях дериватографического анализа, ϵ — энергия активации реакции распада. При горении конденсированной системы температура поверхности ограничена некоторой величиной, характеризующей переход к-фазы в газовую фазу. Дериватограмма также регистрирует температуры перехода конденсированной фазы в газ. Введение поправки на различие скоростей прогрева дает правильный порядок величины температуры поверхности при горении.

Итак, в конденсированной фазе смеси ПХА + ПММА при температурах ниже температуры поверхности при горении T_s протекает реакция взаимодействия с участием продуктов разложения, катализируемых добавкой Fe, а также (но в меньшей степени) добавкой Fe_2O_3 и ферроцена. Следует отметить, что к к-фазным реакциям относим не только реакции типа (к-фаза)₁ + (к-фаза)₂, но и типа (к-фаза) + (газообразные полупродукты), если последние выделяются в подповерхностном реакционном слое.

Структура и температура поверхности горения. Определенный интерес представляют наблюдения за изменениями структуры поверхности горения при введении в состав смеси катализаторов горения. Для

Таблица 2

Состав образца	ПХА	ПММА	ПХА + 1% Fe	ПММА + 1% Fe	$\text{A} + \text{Fe}_2\text{O}_3$; $\text{A} + \text{ф}$; A	A + Fe
Потеря веса, %	1	3	1	3	9	98

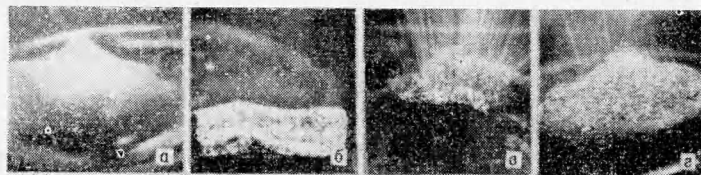


Рис. 2. Фотографии поверхности при горении смесей А (а), А+Fe (б), А+ Fe_2O_3 (в), А+ф (г).

этого был применен метод киносъемки поверхности под различными углами с помощью кинокамеры РФК-5. На всех смесях с добавкой катализатора отмечается появление на поверхности горения отдельных ярко светящихся очагов размером 0,1—0,3 мм (рис. 2).

Измерения температуры поверхности горения показали, что введение катализаторов вызывает рост¹ T_s . Так, при 5 ата введение желе-

¹ Точность измерения поверхности горения составляет $\pm 15^\circ$.

за повышает температуру поверхности от 960 (смесь А) до 1020°К. Повышение давления приводит к увеличению T_s всех исследованных составов. Например, при 10 *атм* температура поверхности смеси А + ф равна 1000°К, а при 40 *атм* она возрастает до 1040°К.

Распределение температуры по высоте факела пламени

На рис. 3 показана максимальная температура горения T_r смесей в зависимости от давления. Введение катализаторов приводит к увеличению T_r при низких давлениях.

Помимо изменения максимальной температуры горения пламени при введении катализаторов изменяется общее распределение температуры по высоте факела пламени. На рис. 4 приведены температурные профили зон пламени исследованных смесей. Наибольшее изменение профиля возникает при введении ферроцена, наименьшее — при введении Fe_2O_3 . Добавки катализаторов существенно изменяют величину теплового потока q из газовой фазы к поверхности горения. Если у состава А величина $q \sim \lambda \frac{\partial T}{\partial x}$ (λ — коэффициент теплопроводности продуктов сгорания) при 20 *атм* составляет 32,5 *ккал/см²·сек*, то у смесей А+ф, А+Fe и А+ Fe_2O_3 она соответственно равна 40,5, 36,5, 34 *ккал/см²·сек*.

Спектроскопические исследования зон горения. Спектроскопические измерения представляют большой интерес в связи с изучением механизма реакций в факеле пламени при горении. В данной работе задача состояла в идентификации спектра излучения продуктов горения, установлении распределения концентрации обнаруженных продуктов по высоте факела пламени, а также, по возможности, выявлении степени их участия в каталитических реакциях.

При горении базовой смеси А отмечается интенсивное излучение у поверхности горения радикала ОН, а также C_2 , CN, NO и N_2 . Высокая интенсивность излучения радикалов ОН, CN может быть вызвана хемилюминесценцией. В табл. 3 приведены основные линии излучения, зарегистрированные в спектрах пламени изученных смесей при 10 *атм*. Из табл. 3 видно, что при введении всех железосодержащих катализаторов в продуктах горения наблюдаются интенсивные линии FeO и Fe. Изменение абсолютной интенсивности линий излучения железа и закиси FeO по высоте факела пламени показано на рис. 5. Резкое возрастание интенсивности излучения линий железа и закиси наблюдается в непосредственной близости от поверхности горения на расстояниях 0,1—0,3 *мм*. По мере удаления от поверхности горения непрерывно растет концентрация двуокиси углерода.

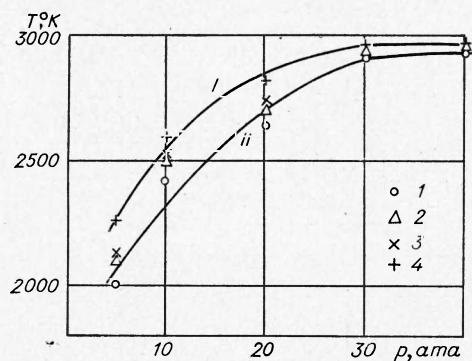


Рис. 3. Изменение температуры горения факела пламени смесей от давления. 1 — А, 2 — А+ Fe_2O_3 ; 3 — А+Fe; 4 — А+ф.

Резкое возрастание интенсивности излучения линий железа и закиси наблюдается в непосредственной близости от поверхности горения на расстояниях 0,1—0,3 *мм*. По мере удаления от поверхности горения непрерывно растет концентрация двуокиси углерода.

Обсуждение результатов

Из данных, полученных в настоящей работе, следует, что введение каталитических добавок перестраивает картину горения как в конденсированной, так и в газовой фазе.

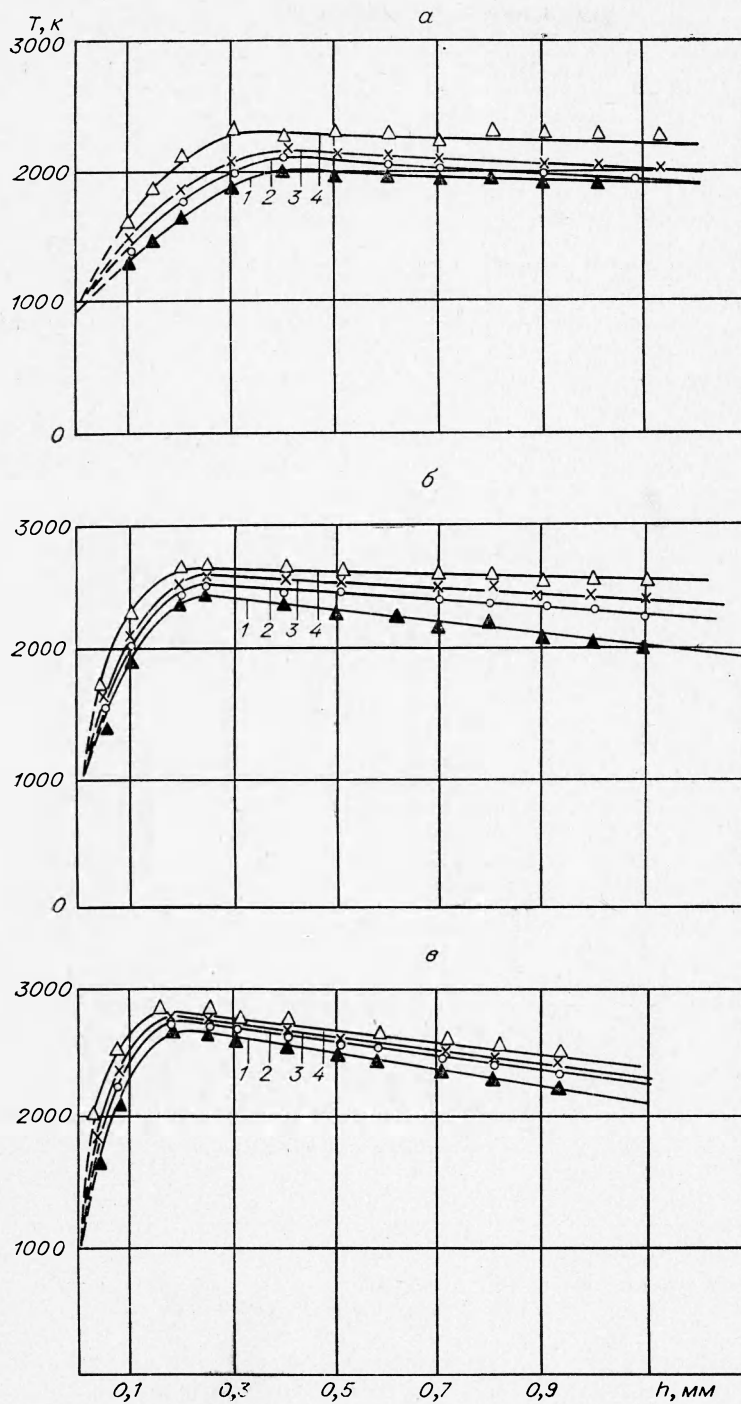


Рис. 4. Распределение температуры по высоте факела пламени от давления 5 (*a*), 10 (*б*), 20 атм (*в*).
 1 — ПХА + ПММА; 2 — Fe_2O_3 ; 3 — Fe; 4 — $Fe(C_5H_5)_2$.

Таблица 3

A+Fe		A+Fe ₂ O ₃		A+ф	
источник	А	источник	А	источник	А
Cl ₂	6267	Cl ₂	{6267 6344	FeO	6097
CN	{3944 3909	CN	{3984 3909	C ₂	4041
	{3861		{3883 3871	CN	{3883 3871 3861
CH	3889	C ₂	{3883 3871	CH	{3889 3628
C ₂	{4041,7 3825		{3825 4041	O ₂	{3143 3840
	O ₂	3672	O ₂	3516	O ₂
Fe	{3737 3719	Fe	{3737 3919	Fe	{3719 3581
	OH		3063	OH	3063
Fe	{3020 2749	NO	3008	Fe	{3047 3020
FeO	6097	FeO	{6097 6218		

Конденсированная фаза. Данные дериватографического анализа определено указывают на влияние каталитических добавок на процессы взаимодействия продуктов разложения компонентов (но не разложение самих компонентов) в к-фазе. Оценка характерных температур протекания каталитических реакций с учетом изменения скорости нагрева до величин, имеющих место в волне горения, показывает, что эти реакции успевают пройти в к-фазе в подповерхностном слое. Далее следует отметить рост температуры поверхности горящих образцов при введении катализаторов. Несомненно,

фиксируемое увеличение T_s связано как с протеканием к-фазных суммарно-экзотермических реакций, так и с прогревом за счет теплопередачи из газовой фазы.

Действительно, в случае одних только к-фазных реакций, протекающих в смесях с катализатором ускоренно и с большим тепловыделением, переход к-фазы в газ происходил бы даже при более низких температурах, чем в смесях без добавок (сравним: дериватограмма смеси A + Fe фиксирует вспышку при 270°C, тогда как к-фаза смеси A существует до ~ 400°C).

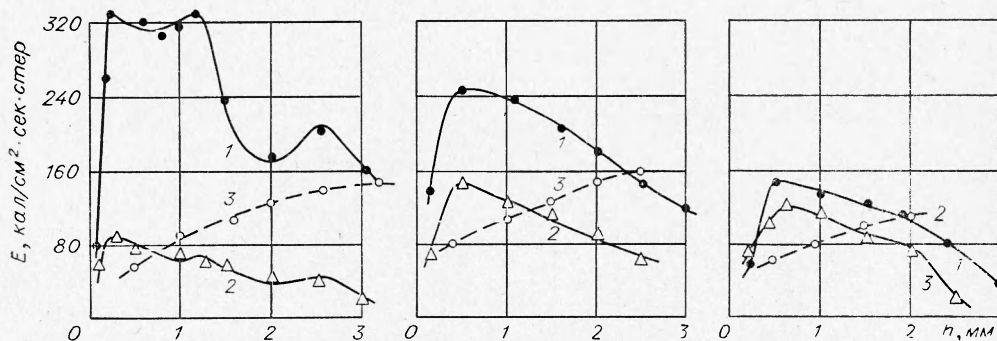


Рис. 5. Распределение абсолютной интенсивности излучения FeO (1), CO₂ (2) и Fe (3) по высоте факела пламени ($p=10$ атм).

Большой интерес представляют опыты, когда на поверхности горящих образцов катализированных смесей существуют отдельные очаги горения повышенной интенсивности. Поскольку число очагов значительно меньше среднего вероятного числа частиц катализаторов на поверхности горения, возникает предположение о возможной агломерации частиц катализатора на поверхности горения. Другой вариант объяснения, не исключающий первый, заключается во введении «критической локальной концентрации катализатора», обеспечивающей развитие очага интенсивной реакции. Образование локальных объемов смеси с кон-

центрацией катализатора выше критической обусловлено флуктуацией распределения катализатора по объему образца. При концентрациях (или объемах) меньших критической величины очаг катализированного горения не развивается. Чем активнее катализатор, тем меньше критический объем, что можно иллюстрировать сравнением фото поверхности горящих смесей $A + Fe_2O_3$ и $A + \phi$, где в последнем случае число очагов существенно больше. С локальным характером действия катализатора связан и вид оттекающих от поверхности продуктов сгорания, представляющих собой отдельные струи. Система очагов, перемещающихся по поверхности горения, обеспечивает первичную переработку продуктов пиролиза окислителя и горючего с участием каталитической добавки. Если факт агломерации частиц катализатора подтвердится, то это может служить одним из объяснений относительно слабого влияния дисперсности катализатора на эффективность его действия.

Таким образом, каталитические дисперсные добавки действуют локально по поверхности горения, причем число развивающихся центров реакции значительно меньше среднего числа частиц, приходящихся на поверхность горения. Отсюда также следует, что в результате воздействия каталитических добавок на процессы взаимодействия в κ -фазе в газовую фазу поступают полупродукты горения измененного состава, отличающегося от такового у некатализированной смеси.

Газовая фаза. Прежде всего обращает на себя внимание увеличение полноты горения при низких давлениях, выражающееся в росте максимальной температуры пламени. Однако эффект ввода катализаторов не ослабевает и даже усиливается при давлениях выше 40 атм, когда T_r всех смесей практически равны. Полученный результат показывает, что изученные катализаторы горения не изменяют конечного состояния системы, но воздействуют на пути прихода к нему. Изменяя состав первичных полупродуктов горения, приходящих в высокотемпературное газовое пламя, катализатор изменяет скорость достижения конечного состояния, что приводит к сужению зон горения, увеличению тепловых потоков из газовой фазы в конденсированную. Высокую активность ферроцена следует связать прежде всего с тем, что высвобождаемые при его распаде (или взаимодействии) каталитически активные центры образуются непосредственно в зоне пламени и являются чистыми.

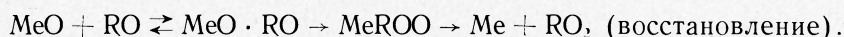
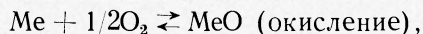
Каталитические активные центры. Данные спектроскопического анализа показывают, что, несмотря на различие в исходном состоянии, все три исследованных железосодержащих катализатора дают в зоне пламени одни и те же спектральные линии излучения железа, закиси железа (FeO) и сплошной фон окиси железа (Fe_2O_3). Других соединений железа в измеримых количествах не обнаружено. Все это позволяет говорить об общем механизме действия всех изученных добавок. Максимальная температура существования этих веществ в кристаллическом состоянии не превышает $1830^\circ K$. В связи с этим гетерогенный катализ на указанных веществах может протекать лишь в узкой температурной зоне, простирающейся от поверхности горения менее чем на 0,1 мм. Именно в этой зоне наблюдается высокая концентрация FeO и Fe во всех смесях (см. рис. 5). Одновременно подобно изменению содержания FeO идет кривая концентрации Fe . В табл. 4 сопоставлены абсолютные значения энергии E максимумов излучения Fe и FeO (а также CO_2) в исследо-

Таблица 4

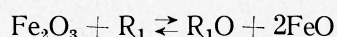
Смесь	u , мм/сек	E , ккал/см ² ·сек·стер.			h^* , мм
		Fe	FeO	CO ₂	
A	3,3	—	—	12	0,3
A+Fe	3,8	90	320	40	0,3
A+Fe ₂ O ₃	4	120	150	65	0,5
A+φ	4,1	150	250	90	0,5

ванных системах со скоростями горения (при 10 ата), здесь h^* — расстояние достижения максимума излучения.

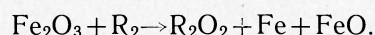
Можно заключить, что в пламени ПХА + ПММА роль гетерогенных каталитических центров играют железо, его закись FeO, а также Fe₂O₃. При температурах выше ~1800° K процесс идет с участием расплавленных и испаряющихся частиц катализатора. Факт увеличения концентрации CO₂ в пламени при введении катализаторов, а также наблюдаемое уменьшение концентрации свободного кислорода позволяют предположить окислительно-восстановительный механизм катализа с известной схемой:



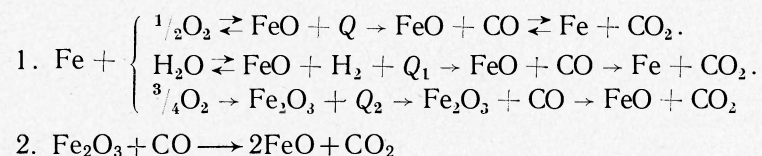
При этом для Fe₂O₃ следует принять начальным актом восстановление по схеме:



или



В данном случае, согласно результатам спектроскопических наблюдений, в качестве RO можно рассматривать окись углерода CO. При этом получаем следующую схему:



и т. д.

Во всех случаях теплоты реакций Q , Q_1 , Q_2 оказываются положительными, и это является причиной ускорения общего процесса горения. В случае ферроцена вначале должно произойти разрушение его молекулы с образованием железа или его окисей, после чего схема взаимодействия оказывается идентичной с приведенной выше.

В качестве радикалов RO и R могут выступать не только кислород, окись углерода и водород, наблюдаемые в пламени данных смесей. Не исключено, что в некоторых случаях это могут быть окислы хлора, азота и т. п.

Особый интерес представляет факт раскисления окиси железа в реакционной зоне. Ранее раскисление наблюдали при медленных каталитических процессах. Так, в работе [9] после взаимодействия CO с поверхностью железоокисного катализатора обнаруживали катионы двухвалентного железа. При этом CO переходит в CO₂ и в этом виде десорбируется с поверхности. При окислении катализатора кислородом происходил переход FeO в Fe₂O₃ и восстановление первоначального состояния катализатора. Таким образом, можно считать элементарным актом катализа раскисление Fe₂O₃ до FeO (или Fe) в поверхностном слое с последующим окислением кислородом или другим окисляющим агентом из числа полупродуктов горения.

Выводы

Получены оценки температуры, начиная с которых сказывается присутствие добавки катализатора на процесс термического разложения смесей в неизотермических условиях. Показано, что эти температуры лежат ниже температуры поверхности при горении образцов топлива.

Для смесей ПХА+ПММА с добавкой 1% Fe_2O_3 и ферроцена скорость разложения смесей увеличивается в интервале 350—360°C; термическое разложение смеси ПХА + ПММА с добавкой 1% Fe происходит со вспышкой при температуре 270°C, что связано с каталитическим влиянием указанных добавок на процесс взаимодействия продуктов разложения ПХА и ПММА. Для всех смесей с добавкой катализатора на поверхности горения наблюдаются отдельные ярко светящиеся очаги размером 0,3—0,1 мм, которые можно рассматривать как возможную агломерацию катализатора в конденсированной фазе топлива.

Температура поверхности горения исследуемых составов повышается с введением катализатора на 40—60°. Максимальная температура факела пламени смесей с катализатором превышает температуру факела пламени без катализатора (при $p \leq 30\text{—}40$ атм).

При горении составов с катализаторами в спектре излучения продуктов горения наблюдаются интенсивные линии FeO, Fe и сплошные полосы Fe_2O_3 , что позволяет сделать вывод об общности механизма каталитического участия указанных добавок в химических реакциях при горении. Установлено, что в факеле пламени идут непрерывные процессы окисления и восстановления железа, которые образуют многократное повторение элементарных каталитических актов.

При введении катализатора в состав смесевое топлива первоначальное его действие осуществляется в конденсированной фазе, где происходит интенсификация скорости окисления продуктов разложения смеси, что и предопределяет увеличение скорости тепловыделения в к-фазе. В факеле пламени действие катализатора в основном сказывается на увеличении скорости тепловыделения, что приводит к увеличению температуры продуктов горения и изменению тепловых потоков в конденсированную фазу. Последовательное воздействие катализатора на конденсированную и газовую фазы приводит к существенным изменениям закономерности горения смесевых систем.

Поступила в редакцию
27/11 1971

ЛИТЕРАТУРА

1. C. U. Pittman. AIAAJ., 1969, 7, 2.
2. В. С. Никифоров, Н. Н. Бахман. ФГВ, 1969, 5, 2.
3. I. V. Levy, R. Fridman. 8-th Symposium (International) on Combustion Baltimore, 1962.
4. М. Я. Ген, М. С. Зискин, Ю. И. Петров. Докл. АН СССР, 1959, 127, 2.
5. П. Ф. Похил, В. М. Мальцев и др. ЖФХТ, 1968, 42, 9.
6. П. Ф. Похил, В. Е. Мальцев, В. А. Селезнев. ЖФХ, 1965, XXXIX, 3.
7. П. Ф. Похил, В. М. Мальцев, В. М. Зайцев. Методы исследования процессов горения и детонации. М., «Наука», 1969.
8. П. Ф. Похил, В. М. Мальцев и др. Передовой научно-технический и производственный опыт. ГОСИНТИ № 18—66—713/43. М., 1966.
9. И. П. Суздаев, А. В. Шкарин, Г. М. Жаброва. Кинетика и катализ, 1969, 10, 1.