

ВЛИЯНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ИЗБЫТКА ГОРЮЧЕГО НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИНГИБИРОВАНИЯ ЛАМИНАРНЫХ ПЕРЕМЕШАННЫХ ВОДОРОДО- И УГЛЕВОДОДОВОЗДУШНЫХ ПЛАМЕН ДОБАВКАМИ ТРИМЕТИЛФОСФАТА

И. В. Рыбицкая, А. Г. Шмаков, В. М. Шварцберг, О. П. Коробейничев

Институт химической кинетики и горения СО РАН, 630090 Новосибирск, korobein@kinetics.nsc.ru

Представлены результаты экспериментального исследования и численного моделирования влияния коэффициента избытка горючего ($\phi = 0.6 \div 1.6$) на скорость распространения ламинарных, предварительно перемешанных атмосферных метано- и пропановоздушных пламен без добавки и с добавкой 0.06 % триметилфосфата (ТМФ). Путем моделирования изучено влияние состава ($\phi = 0.7 \div 4.5$) на скорость распространения водородовоздушных пламен без добавки и с добавкой 0.1 % ТМФ. Результаты расчетов и экспериментов показали, что в пламенах углеводородов с добавкой ТМФ эффективность ингибирования резко уменьшается с ростом ϕ в диапазоне его изменения от $1.2 \div 1.3$ до $1.4 \div 1.6$, тогда как в водородовоздушном пламени эффективность ингибирования возрастает с увеличением ϕ от 1.5 до 4.5. Анализ коэффициентов чувствительности скорости распространения пламен к константам скорости реакций позволил выделить реакции, определяющие характер зависимости эффективности ингибирования от избытка горючего в этих пламенах.

Ключевые слова: скорость распространения пламени, ингибирование пламен, кинетический механизм, численное моделирование.

ВВЕДЕНИЕ

Интерес к изучению химии горения фосфорорганических соединений (ФОС) вызван их уникальными свойствами. Известно, что ФОС являются эффективными пламегасителями [1–5] и перспективны для использования в пожаротушении. Также эти соединения могут служить имитаторами при отработке технологии уничтожения сжиганием боевых отравляющих веществ, таких как зарин, зоман, а также других токсичных веществ (пестицидов и др.) [6].

Работа [2] является одним из первых исследований химического механизма превращений, происходящих в пламенах с добавкой ФОС. С тех пор механизм ингибирования пламени добавками ФОС постоянно уточнялся [6–10]. В работах [11, 12] проведено исследование кинетики превращения ФОС в проточном реакторе и в пламени. Была значительно усовершенствована кинетическая схема в работах [13, 14]: авторы с помощью квантово-химических методов расчета уточнили энтальпии образования большинства ФОС и константы скоро-

стей некоторых реакций, а также ввели дополнительный путь для одной из основных реакций $\text{HOPO}_2 + \text{H} = \text{H}_2\text{O} + \text{PO}_2$, ответственных за ингибирование пламени.

Результаты измерения скорости свободного распространения пламен используются для проверки и совершенствования химических механизмов горения и превращения веществ в пламени. Однако часто используемый для измерения метод бунзеновской горелки [15], в котором скорость распространения пламени измеряется по площади поверхности конуса пламени, не позволяет получать данные с достаточной точностью. Ошибки измерения скорости распространения пламен методом бунзеновской горелки составляют 5 % в стехиометрических и $15 \div 20$ % в бедных и богатых пламенах.

В работах [16, 17] предложен новый метод стабилизации пламени на плоской горелке путем установления нулевого потока тепла в горелку, позволяющий с гораздо большей точностью (3 % в стехиометрических, $5 \div 10$ % в бедных и богатых пламенах) определять скорость свободного распространения пламен в широком диапазоне составов горючих смесей. Авторы [18] измеряли скорость распространения ря-

Работа выполнена при поддержке INTAS (грант № 03-51-4724), Фонда содействия отечественной науке, а также Президиума Сибирского отделения РАН по гранту для молодых ученых № 76.

да углеводородовоздушных пламен при атмосферном давлении, различных составах и начальных температурах горючих смесей. В работах [19–22] показано, что использование метода [16, 17] позволяет получить пламя, близкое к полностью равномерному и адиабатическому. Таким образом, метод [16, 17] дает возможность с высокой точностью измерять скорость распространения пламен, а также стабилизировать пламена на плоской горелке для изучения их химической и тепловой структуры в условиях, близких к адиабатическим. Это облегчает сопоставление результатов моделирования и экспериментов по структуре и скорости распространения пламен.

К настоящему времени получено большое количество экспериментальных данных и результатов расчетов по ингибированию различных пламен углеводородов добавками ФОС. В частности, большой задел уже имеется в исследовании структуры пламен предварительно перемешанных смесей с добавками ФОС, стабилизированных на плоской горелке, а также в исследовании влияния ФОС на скорость распространения пламен предварительно перемешанных горючих смесей.

В работе [23] получены экспериментальные данные по скорости распространения пропано- и метановоздушных пламен различного состава без добавки и с добавкой 600 ppm триметилфосфата (ТМФ) при атмосферном давлении, которые были сопоставлены с результатами расчета с использованием механизма Вестбрука деструкции ТМФ [13] и двумя различными схемами окисления углеводородов [24]. Было показано, что в пропановоздушном пламени результаты моделирования с использованием механизма [13] хорошо согласуются с экспериментальными данными в пределах ошибки эксперимента, а также с известными литературными данными. В метановоздушном пламени расчеты по механизму GRI 3.0 лучше согласуются с экспериментальными данными для пламен с $\phi \approx 1$, в то время как в бедных и богатых пламенах лучшее согласие дает механизм [13].

Одним из наиболее простых и хорошо изученных является водородокислородное пламя. Опубликован ряд работ, посвященных измерению и расчету скоростей свободного распространения водородокислородных пламен при различных начальных составах горючих смесей [25–28]. Исследованию химической струк-

туры водородокислородных пламен при низком давлении посвящены работы [29–31].

Однако, несмотря на большое количество уже проведенных теоретических и экспериментальных исследований, остается немало вопросов, касающихся химического механизма ингибирования пламен добавками ФОС. Также сравнительно немногочисленны данные по влиянию состава горючей смеси на скорость распространения атмосферных углеводородных и водородных пламен с добавками ФОС.

Целью настоящей работы является изучение главных особенностей механизма ингибирования пламен добавками ФОС путем моделирования и экспериментального исследования эффективности ингибирования атмосферных метано-, пропано- и водородовоздушных пламен добавками ТМФ при различных начальных составах горючих смесей.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Скорость распространения пламени измерялась на плоской горелке методом нулевого потока тепла (heat flux method) [16, 17]. Схема горелки приведена на рис. 1. Горелка представляла собой трубку высотой 350 мм, на которой установлен медный диск диаметром 24 мм и толщиной 3 мм с отверстиями диаметром 0.5 мм, равномерно расположенными на расстоянии 0.7 мм друг от друга. Нагрев медного

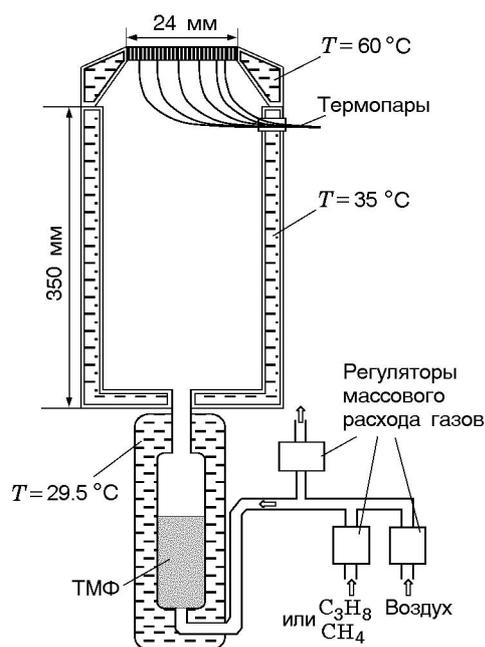


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

диска и горючей смеси проводился по внешнему диаметру горелки с помощью циркулирующей воды и термостатов. Температура краев диска поддерживалась равной $60\text{ }^{\circ}\text{C}$, температура горючей смеси, состоящей из пропана или метана и воздуха, — $35\text{ }^{\circ}\text{C}$. Состав и расход горючей смеси устанавливались с помощью регуляторов массового потока газов фирмы «MKS Instruments». Для измерения радиального распределения температур на поверхности горелки в ее отверстия были припаяны спай медь-константановых термопар на расстояниях 0, 2.4, 4.5, 7, 10 и 12 мм от оси горелки.

Сущность метода нулевого потока тепла заключается в следующем. Горючая смесь, проходя через горелку, нагревается, так как температура краев перфорированного диска горелки поддерживается с помощью термостата более высокой, чем температура горючей смеси. Как показано в [16], это очень важное условие, выполнение которого обеспечивает стабилизацию пламени на горелке не только в том случае, когда скорость потока горючей смеси меньше скорости распространения пламени (когда стабилизация пламени происходит в основном за счет теплопотерь в горелку), но также и тогда, когда скорость потока немного выше скорости распространения пламени. Благодаря наличию в этом случае небольшого радиального градиента температуры в горелке, горючая смесь вблизи ее краев прогревается немного сильнее, чем в центре горелки (который охлаждается более холодной горючей смесью). В результате этого локальная скорость распространения пламени вблизи краев горелки немного выше, чем в центре горелки, что обеспечивает стабилизацию пламени.

Если скорость потока горючей смеси больше скорости свободного распространения пламени, суммарный тепловой поток в горелку (сумма потоков тепла из пламени в горелку и из горелки в свежую горючую смесь) меньше нуля, в этом случае температура центра перфорированного диска горелки меньше температуры его краев. Если скорость потока горючей смеси ниже скорости свободного распространения пламени, суммарный тепловой поток в горелку больше нуля, в этом случае температура центра перфорированного диска горелки выше температуры его краев. Если радиальное распределение температуры на поверхности перфорированного диска горелки равномерно и его температура равна температуре термостата,

то суммарный тепловой поток равен нулю и скорость потока горючей смеси равна скорости свободного распространения пламени, пламя находится в близких к адиабатическим условиях. В этих условиях скорость распространения и адиабатическая температура пламен определяются только исходным составом горючей смеси и ее температурой ($35\text{ }^{\circ}\text{C}$) и не зависят от температуры диска горелки. Как было показано в [16], профили температуры в свободно распространяющемся пламени и стабилизированном на плоской горелке в адиабатических условиях отличаются только в области самой горелки и полностью совпадают вне ее (в зоне пламени). Температура в области горелки достаточно низкая, поэтому здесь химические реакции практически не протекают, и это позволяет использовать стабилизированное в адиабатических условиях пламя на плоской горелке как эквивалент свободно распространяющегося пламени.

ТМФ вводился в горючую смесь с помощью барботера, заполненного стеклянными капиллярами для увеличения поверхности испарения ТМФ. Температура барботера поддерживалась с помощью термостата такой, чтобы концентрация насыщенных паров ТМФ соответствовала заданной концентрации добавки. Измерения выполнялись при температуре барботера $29.5 \pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$, что соответствует концентрации ТМФ $0.06 \pm 0.003\%$. Точность задания концентрации контролировалась взвешиванием барботера до и после пропускания через него известного объема горючей смеси. Как показали эти измерения, в данных условиях эксперимента концентрация ТМФ в смеси не зависит от ее потока.

МОДЕЛИРОВАНИЕ

Моделирование скорости распространения пламени выполнялось с помощью программных пакетов PREMIX [32] и CHEMKIN-II [33], которые позволяют описывать многокомпонентные ламинарные пламена с учетом их термодинамики, кинетики, транспортных свойств, а также детального химического механизма реакций.

Для расчетов использовался механизм реакций, описанный в [13]. В него входят механизм окисления углеводородов, предложенный Кураном [34], и механизм превращения ФОС, разработанный Вестбруком с коллегами [13].

При моделировании метановоздушного пламени также использовался механизм, состоящий из механизма GRI 3.0 [24] и того же набора реакций с участием ФОС, что и в [13]. Моделирование скорости распространения водородовоздушного пламени выполнялось с использованием механизма [13].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные авторами в работе [23] экспериментальные данные по скоростям распространения пропано- и метановоздушных пламен без добавки хорошо согласуются с данными, полученными методом нулевого потока тепла в горелку [18]. Сопоставление экспериментальных данных и результатов моделирования в пламенах без добавки и с добавкой 0.06 % ТМФ показало удовлетворительное согласие для пропановоздушного пламени и некоторое расхождение для метановоздушного пламени [23]. Результаты моделирования в метановоздушном пламени по механизму GRI 3.0 лучше согласуются с экспериментальными данными для пламен при $\phi \approx 1$, в то время как в бедных и богатых пламенах лучшее согласие обеспечивает механизм [13].

Эффективность действия ингибитора ТМФ на пропано- и метановоздушные пламена, определенную как $F = (u_0 - u)/u_0$, где u_0 , u — скорости распространения пламени без добавки и с добавкой, иллюстрирует рис. 2.

Моделирование предсказывает рост эффективности с увеличением ϕ до 1.3 и 1.2 для пламен C_3H_8 и CH_4 соответственно и ее падение в области богатых пламен. В экспериментах также наблюдается резкое падение эффективности ингибирования в богатых пламенах, в то время как в бедных и близких к стехиометрическим пламенах экспериментальная зависимость $F(\phi)$ выражена слабо. Расхождение между данными расчета и измерений, вероятно, связано с несовершенством как механизма реакций с участием ФОС, так и механизмов горения углеводородов. Последнее утверждение подтверждается тем, что две различные кинетические схемы горения углеводородов [13, 24], использованные для расчета скорости распространения метанового пламени с добавкой ТМФ, в комбинации с одним и тем же набором реакций ТМФ дают несколько отличающиеся результаты. Нужно отметить, что использованные для расчетов механизмы горения углеводородов ранее уже были апробиро-

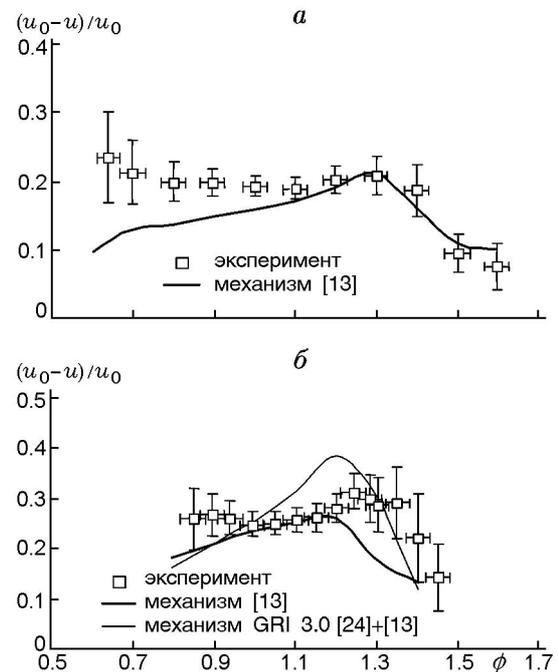


Рис. 2. Зависимость эффективности ингибирования ТМФ от коэффициента избытка горючего в пропановоздушном (а) и метановоздушном (б) пламенах

ваны различными исследователями сопоставлением результатов моделирования и эксперимента как по скорости распространения пламен, так и по их структуре, задержке воспламенения в ударных волнах и окислению в проточном реакторе. Поэтому использование двух различных механизмов углеводородов [13, 24] позволяет оценить, насколько они могут влиять на результаты расчетов скорости пламен с добавкой ТМФ. Поскольку примененные кинетические схемы [13, 24] состоят из нескольких сотен реакций, то провести точную оценку погрешности вычислений, исходя из погрешностей каждой константы скорости реакции, не представляется возможным. Поэтому приемлемым решением этой проблемы является расчет с использованием нескольких кинетических схем, что и было выполнено в данной работе. Как видно на рис. 2, б, эти две различные модели хотя и дают отличающиеся абсолютные величины F при $\phi \approx 1.2$, тем не менее полученные по ним зависимости $F(\phi)$ качественно похожи.

Моделирование скорости распространения водородовоздушного пламени (при $p = 1$ атм, $T_0 = 298$ К) без добавки и с добавкой 0.1 % ТМФ показало обратную зависимость эффек-

тивности действия ингибитора (рис. 3). Эффективность добавки ТМФ в этом пламени минимальна при $\phi = 1.4$ и возрастает в области богатых и бедных пламен.

На рис. 4 представлены зависимости от ϕ коэффициентов чувствительности скорости пламени к изменению констант скоростей наиболее важных реакций в пропано- и водородовоздушных пламенах с добавкой ТМФ. Коэффициент чувствительности определяется по формуле $[(u - u_{5A})/u] \cdot 100\%$, где u , u_{5A} — скорость распространения пламени, рассчитанная по механизму [13] и по этому же механизму, но с увеличенным в 5 раз значением предэкспонента константы скорости реакции.

Различие в поведении зависимостей эффективности ингибирования ТМФ от ϕ в пропано- и водородовоздушных пламенах связано с изменением порядка важности реакций, ответственных за ингибирование в этих пламенах. Так, реакции $\text{PO}_2 + \text{H} + \text{M} = \text{НОРО} + \text{M}$ и $\text{НОРО}_2 + \text{H} = \text{PO}_2 + \text{H}_2\text{O}$ являются наиболее значимыми в бедном пропановоздушном пламени, поскольку в нем преобладают соединения фосфора с большей степенью окисления (более окисленные), такие как PO_2 и НОРО_2 . Та же реакция $\text{НОРО}_2 + \text{H} = \text{PO}_2 + \text{H}_2\text{O}$ вносит существенный вклад в ингибирование бедных водородовоздушных пламен. При ингибировании богатых пропановоздушных пламен более важной становится реакция $\text{НОРО} + \text{OH} = \text{PO}_2 + \text{H}_2\text{O}$, которая и отвечает за резкое снижение эффективности при $\phi = 1.3$. Зависимость коэффициента чувствительности этой реакции (см. рис. 4, а) коррелирует с зависимостью эффективности действия ТМФ (см. рис. 2, а) — обе имеют максимум при $\phi \approx 1.3$. В богатых водородовоздушных пламенах при $\phi > 2.5$ более важной становится реакция $\text{НОРО} + \text{H} = \text{H}_2 + \text{PO}_2$, которая в совокупности с остальными реакциями обуславливает рост эффективности ингибирования этого пламени добавкой ТМФ с увеличением ϕ .

Таким образом, различия в поведении эффективности действия ТМФ на углеводородо- и водородовоздушные пламена связаны с изменением значимости реакций взаимодействия радикалов с конечными фосфорсодержащими соединениями.

Рассчитанные зависимости эффективности ингибирования от ϕ коррелируют с зависимостями изменения концентрации атомов Н и радикалов ОН от ϕ в зоне химических реак-

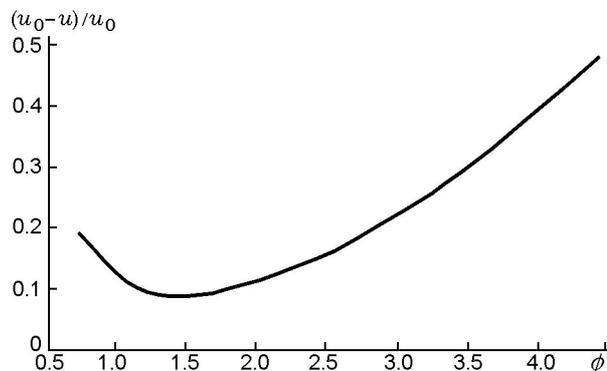


Рис. 3. Зависимость эффективности ингибирования ТМФ от коэффициента избытка горючего в водородовоздушном пламени

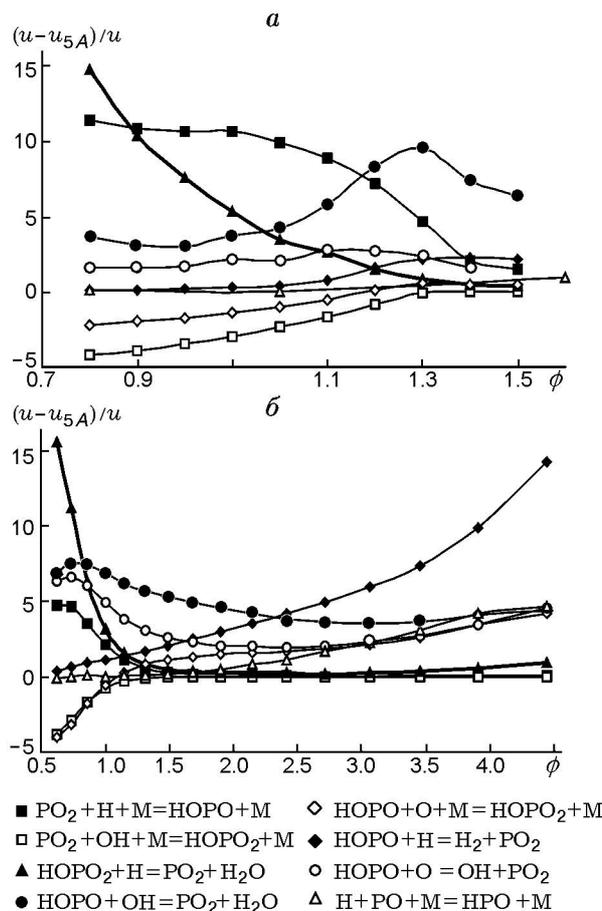


Рис. 4. Коэффициенты чувствительности скорости распространения пламени к изменению констант скорости реакций в пропановоздушных (а) и водородовоздушных (б) пламенах с добавкой ТМФ

ций при введении ТМФ в пламя. На рис. 5 приведены максимальные в зоне химических реакций концентрации радикалов Н и ОН в пропановоздушном пламени без добавки и с добавкой ТМФ и их относительное уменьшение в зависимости от коэффициента избытка топлива. Как видно из рисунка, относительное уменьшение концентрации радикалов ($\Delta C_i/C_i$), так же как и эффективность ингибирования добавкой ТМФ (см. рис. 2), имеет излом при $\phi = 1.3$, что показывает непосредственную связь между уменьшением концентрации активных радикалов и действием добавки ТМФ. Аналогичные зависимости для водородовоздушного пламени представлены на рис. 6.

Падение эффективности ингибирования в богатых углеводородных пламенах с ростом ϕ может происходить благодаря увеличению концентраций фосфорорганических продуктов неполного распада ТМФ в зоне конечных продуктов пламен с большим избытком топлива. Такие соединения, как CH_3PO , CH_3PO_2 , CH_3OPO , CH_3OPO_2 , CH_2OPO_2 , возможно, малоактивны или не способны катализировать рекомбинацию радикалов Н и ОН, поэтому по-

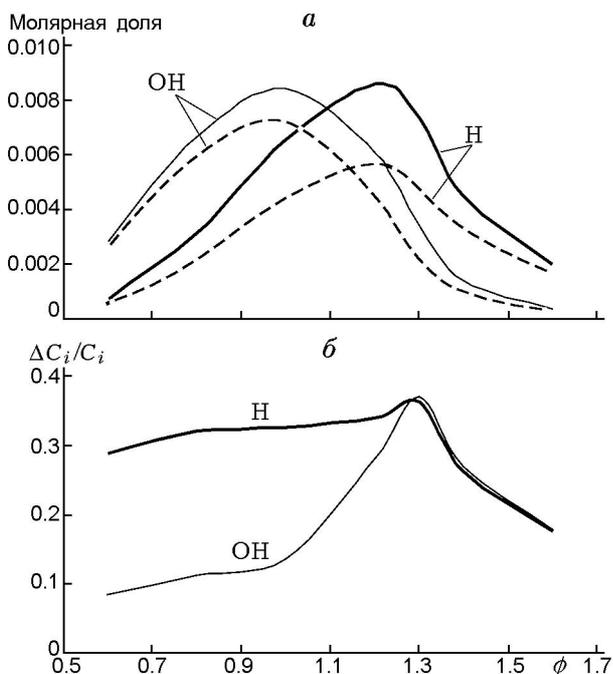


Рис. 5. Максимальные концентрации активных радикалов в пропановоздушном пламени без добавки (а, сплошные линии) и с добавкой 0.06 % ТМФ (а, штриховые линии) и их относительное уменьшение (б)

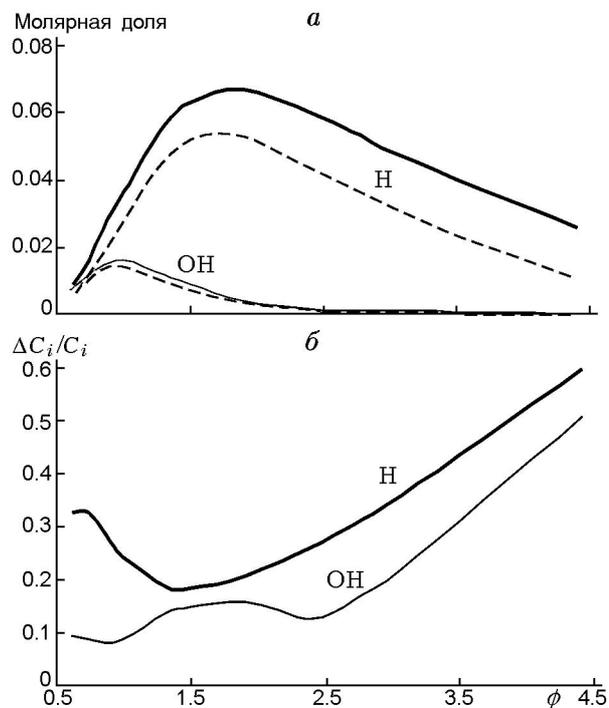


Рис. 6. Максимальные концентрации активных радикалов в водородовоздушном пламени без добавки (а, сплошные линии) и с добавкой 0.1 % ТМФ (а, штриховые линии), а также их относительное уменьшение (б)

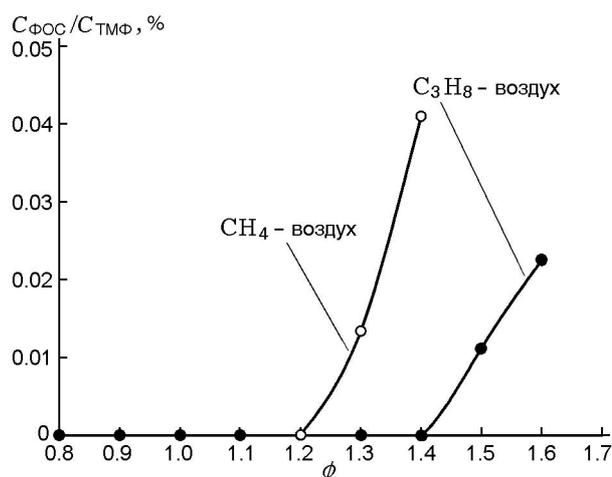


Рис. 7. Зависимость суммарной концентрации CH_3PO , CH_3PO_2 , CH_3OPO , CH_3OPO_2 , CH_2OPO_2 , отнесенной к начальной концентрации ТМФ в пламени ($C_{\text{Фос}}/C_{\text{ТМФ}}$) от коэффициента избытка горючего

вышение их концентрации в продуктах сгорания приводит к снижению концентрации активных ФОС и эффективности ингибирования. На рис. 7 приведена зависимость отношения суммарной концентрации CH_3PO , CH_3PO_2 , CH_3PO , CH_3PO_2 , CH_2PO_2 в зоне конечных продуктов сгорания пропано- и метановоздушных пламен к начальной концентрации ТМФ в зависимости от коэффициента избытка топлива. Из приведенных данных видно, что резкое увеличение суммарной концентрации фосфорорганических продуктов неполной деструкции ТМФ наблюдается в пропановоздушных пламенах с $\phi = 1.4$. Это практически совпадает с максимумами зависимости эффективности ингибирования от коэффициента избытка горючего в этих пламенах. Интересно отметить, что подобная зависимость эффективности ингибирования для метановоздушных пламен имеет максимум при $\phi = 1.2 \div 1.3$ и при этом же значении ϕ наблюдается резкий рост суммарной концентрации фосфорорганических продуктов. Это дополнительно указывает на возможную связь падения эффективности ингибирования с накоплением в продуктах сгорания малоактивных с точки зрения их взаимодействия с H и OH фосфорорганических продуктов горения ТМФ.

ВЫВОДЫ

Изучено влияние коэффициента избытка горючего на скорость распространения атмосферных метано-, пропано- и водородовоздушных пламен без добавки и с добавкой триметилфосфата.

Обнаружено, что в пламенах углеводородов с добавкой ТМФ расчет и эксперимент показывают резкое уменьшение эффективности ингибирования с ростом ϕ от $1.2 \div 1.3$ до $1.4 \div 1.6$, тогда как в водородовоздушном пламени эффективность ингибирования возрастает с ростом ϕ от 1.5 до 4.5, что связано с изменением важности реакций взаимодействия радикалов с конечными фосфорсодержащими соединениями.

Показано, что при ингибировании бедных пламен наиболее значимы реакции $\text{PO}_2 + \text{H} + \text{M} = \text{HOPO} + \text{M}$ и $\text{HOPO}_2 + \text{H} = \text{PO}_2 + \text{H}_2\text{O}$ для пропановоздушного пламени и та же реакция $\text{HOPO}_2 + \text{H} = \text{PO}_2 + \text{H}_2\text{O}$ для водородовоздушного пламени. В богатых же пламенах более важными становятся реакции $\text{HOPO} + \text{OH} = \text{PO}_2 + \text{H}_2\text{O}$ (пропановоздушное пламя)

и $\text{HOPO} + \text{H} = \text{H}_2 + \text{PO}_2$ (водородовоздушное пламя). Эти реакции обуславливают различия в поведении эффективности действия ТМФ.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Wainner R. T., McNesby K. L., Daniel R. G., Miziolek A. W., Babushok V. I.** Experimental and mechanistic investigation of opposed-flow propane/air flames by phosphorus-containing compounds // Proc. of the 10th Halon Options Technical Working Conf. Albuquerque, May 2–4 2000. P. 141–153.
2. **Hastie J. W., Bonnell D. W.** Molecular chemistry of inhibited combustion systems // National Bureau of Standards. 1980. NBSIR. P. 80–2169.
3. **MacDonald M. A., Jayaweera T. M., Fisher E. M., Gouldin F. C.** Inhibition of non-premixed flames by phosphorus-containing compounds // Combust. Flame. 1999. V. 116, N 1–2. P. 166–176.
4. **Skaggs R. R., Daniel R. G., Miziolek A. W., McNesby K. L.** Spectroscopic studies of inhibited opposed flow propane/air flames // Proc. of the First Joint Meeting of the U. S. Sections of the Combustion Inst. Washington, DC, 1999. P. 575–579.
5. **Shmakov A. G., Korobeinichev O. P., Bolshova T. A., Shvartsberg V. M., Knyazkov D. A., Zakharov L., Kudryavtsev I. Y., Furin G. G.** Study of effect of organophosphorus fire suppressants on premixed $\text{C}_3\text{H}_8/\text{air}$ and diffusive counterflow CH_4/air flames // Proc. of Halon Options Technical Working Conf. Albuquerque, April 30–May 2 2002. P. 1–9. http://www.bfrl.nist.gov/866/HOTWC/HOTWC2002/pubs/24_Korobeinichev_et_al.pdf.
6. **Werner J. H., Cool T. A.** Kinetic model for the decomposition of DMMP in a hydrogen/oxygen flame // Combust. Flame. 1999. V. 117. P. 78–98.
7. **Twarowski A. J.** The influence of phosphorus oxides and acids on rate of $\text{H} + \text{OH}$ recombination // Combust. Flame. 1993. V. 94. P. 91–107.
8. **Twarowski A. J.** Reduction of a phosphorus oxide and acid reaction set // Combust. Flame. 1995. V. 102. P. 55–63.
9. **Twarowski A. J.** The temperature dependence of $\text{H} + \text{OH}$ recombination in phosphorus oxide containing combustion gases // Combust. Flame. 1996. V. 105. P. 407–413.
10. **Babushok V., Tsang W.** Influence of phosphorus-containing fire suppressants on flame propagation // Proc. of Third Intern. Conf. on Fire Research and Engineering. Chicago, Illinois, 4–8 October 1999. P. 257–267.
11. **Glaude P. A., Curran H. J., Pitz W. J., Westbrook C. K.** Kinetic study of the combustion of organophosphorus compounds // Proc. of Twenty-Eighth Intern. Symp. on Combustion.

- Pittsburgh: The Combustion Inst., 2001. P. 1749–1756.
12. **Glaude P. A., Melius C., Pitz W. J., Westbrook C. K.** Detailed chemical kinetic reaction mechanisms for incineration of organophosphorus and fluoro-organophosphorus compounds // Proc. of Twenty-Ninth Intern. Symp. on Combustion. Pittsburgh: The Combustion Inst., 2002. P. 2469–2476. http://www-cms.llnl.gov/combustion/combustion_home.html.
 13. **Jayaweera T. M., Melius C. F., Pitz W. J., Westbrook C. K., Korobeinichev O. P., Shvartsberg V. M., Shmakov A. G., Rybitskaya I. V., Curran H.** Flame inhibition by phosphorus-containing compounds over a range of equivalence ratios // Combust. Flame. 2005. V. 140. P. 103–115.
 14. **Korobeinichev O. P., Shvartsberg V. M., Shmakov A. G., Bolshova T. A., Jayaweera T. M., Melius C. F., Pitz W. J., Westbrook C. K., Curran H.** Flame inhibition by phosphorus-containing compounds in lean and rich propane flames // Proc. of the Combust. Inst. 2004. V. 30. P. 2353–2360.
 15. **Linteris G. T., Truett G. T.** Inhibition of premixed methane-air flames by fluoromethanes // Combust. Flame. 1996. V. 105, N 1–2. P. 15–27.
 16. **De Goey L. P. H., Van Maaren A., Quax R. M.** Stabilization of adiabatic premixed laminar flames on a flat flame burner // Combust. Sci. Technol. 1993. V. 92. P. 201–207.
 17. **Van Maaren A., Thung D. S., de Goey L. P. H.** Measurement of flame temperature and adiabatic burning velocity of methane/air mixtures // Combust. Sci. Technol. 1994. V. 96. P. 327–344.
 18. **Bosschaart K. J., de Goey L. P. H., Burgers J. M.** The laminar burning velocity of flames propagation in mixtures of hydrocarbons and air measured with the heat flux method // Combust. Flame. 2004. V. 136, N 3. P. 261–269.
 19. **De Goey L. P. H., Somers L. M. T., Bosch W. M. M. L., Mallens R. M. M., Van Maaren A., Quax R. M.** Modelling of the small scale structure of flat burner-stabilized flames // Combust. Sci. Technol. 1995. V. 104. P. 387.
 20. **Van Maaren A., de Goey L. P. H.** Laser Doppler thermometry in flat flames // Combust. Sci. Technol. 1994. V. 99. P. 105–118.
 21. **Van Maaren A., de Goey L. P. H.** Stretch and the adiabatic burning velocity of methane and propane-air flames // Combust. Sci. Technol. 1995. V. 102. P. 309.
 22. **Bosschaart K. J., Versluis M., Knikker R., van der Meer Th. H., Schreel K. R. A. W., de Goe L. P. H., van Steenhoven A. A.** The heat flux method for producing burner stabilized adiabatic flames: an evaluation with CARS thermometry // Combust. Sci. Technol. 2001. V. 168. P. 69–87.
 23. **Рыбичкая И. В., Шмаков А. Г., Коробейничев О. П.** Определение скорости распространения углеводородовоздушных пламен с добавками фосфорорганических соединений при атмосферном давлении // Физика горения и взрыва. 2007. Т. 43, № 3. С. 9–14.
 24. **Smith G. P., Golden D. M., Frenklach M., Moriarty N. W., Eiteneer B., Goldenberg M., Bowman C. T., Hanson R. K., Song S., William C., Gardiner J., Lissianski V. V., Qin Z.** GRI Mech 3.0. 1999. http://www.me.berkeley.edu/gri_mech/.
 25. **Vagelopoulos C. M., Egolfopoulos F. N., Law C. K.** Further consideration on the determination of laminar flame speeds with counterflow twin-flame technique // 25th Symp. (Intern.) on Combustion. Pittsburgh: The Combustion Inst., 1994. P. 1341–1347.
 26. **Koroll G. W., Kumar R. K., Bowles E. M.** Burning velocities of hydrogen-air mixtures // Combust. Flame. 1993. V. 94. P. 330.
 27. **Dowdy D. R., Smith D. B., Taylor S. C., Williams A.** The use of expanding spherical flames to determine burning velocities and stretch effects in hydrogen/air mixtures // 23rd Symp. (Intern.) on Combustion. Pittsburgh: The Combustion Inst., 1990. P. 325–332.
 28. **Egolfopoulos F. N., Law C. K.** An experimental and computation study of the burning rates of ultra-lean to moderately-rich $H_2/O_2/N_2$ laminar flames with pressure variations // Ibid. P. 333–340.
 29. **Brown N. J., Eberius K. H., Fristrom R. M., et al.** Low pressure hydrogen-oxygen flame studies // Combust. Flame. 1978. V. 33. P. 151.
 30. **Dixon-Lewis G., Sutton M. M., Willams A.** Flame structure and flame reaction kinetic. VII. Structure, properties, and mechanism of a rich Hydrogen + Nitrogen + Oxygen flame at low pressure // Proc. Roy. Soc. Ser. A. 1970. V. 317. P. 227–234.
 31. **Vandooren J., Bian J.** Validation of H_2/O_2 reaction mechanisms by comparison with the experimental structure of a rich hydrogen-oxygen flame // 23rd Symp. (Intern.) on Combustion. Pittsburgh: The Combustion Inst., 1990. P. 839.
 32. **Kee R. J., Grcar J. F., Smooke M. D., Miller J. A.** PREMIX // Sandia National Laboratories Report No SAND85-8240. 1990.
 33. **Kee R. J., Rypley F. M., Miller J. A.** CHEMKIN-II a Fortran chemical kinetics package for the analysis of gas phase chemical kinetics // Sandia National Laboratories Report N SAND89-8009. 1989.

34. **Curran H. J., Jayaweera T. M., Pitz W. J., Westbrook C. K.** A detailed modeling study of propane oxidation // Western States Section of the Combustion Institute. Davis, California, 2004. Paper 04S-58.
-

*Поступила в редакцию 30/X 2006 г.,
в окончательном варианте — 18/XII 2007 г.*