

УДК 536.46

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ЛАМИНАРНЫХ ПЛАМЕН ПРЕДВАРИТЕЛЬНО ПЕРЕМЕШАННЫХ СМЕСЕЙ ЭТАНОЛ/МЕТАН/КИСЛОРОД/АРГОН

Л. С. Тран, П. А. Глод, Ф. Баттэн-Леклерк

Университет Лоррена, 54001 Нанси, Франция, pierre-alexandre.glaude@univ-lorraine.fr

Изучена структура стехиометрических ламинарных пламен метана, этанола и предварительно перемешанных смесей метана с 30 % этанола при низком давлении (6.7 кПа). Методом зондового отбора с последующим анализом на газовом хроматографе измерены профили молярных долей следующих компонентов пламен: CH_4 , $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$, O_2 , Ar , CO , CO_2 , H_2O , H_2 , C_2H_6 , C_2H_4 , C_2H_2 , C_3H_8 , C_3H_6 , $\text{CH}_3\text{—C}\equiv\text{CH}$ (пропин), $\text{CH}_2=\text{C}=\text{CH}_2$ (аллен), CH_2O и CH_3NCO . Платиновые термометрами измерены профили температуры пламен. Проанализированы сходство и различия в структуре пламен. Установлено, что во всех пламенах молярные доли промежуточных продуктов, содержащих два атома углерода, существенно превышают молярные доли продуктов с тремя атомами углерода. Молярные доли промежуточных продуктов максимальны в пламени этанола, несколько ниже в пламени этанол/метан и минимальны в пламени метана.

Ключевые слова: предварительно перемешанные ламинарные пламена, метан, этанол.

ВВЕДЕНИЕ

Объявленное в последнее время сокращение запасов нефти и строгое ограничение содержания вредных примесей в выхлопных газах двигателей внутреннего сгорания стимулировали поиск альтернативных топлив.

Этанол считается эффективным возобновляемым альтернативным топливом с высоким октановым числом [1]. Это кислородсодержащее топливо может быть получено ферментацией сахаров и крахмалов, производимых из растительного сырья, такого как сахарный тростник или зерно [2]. Недавно предложены методы получения этанола из целлюлозы [3] и морских водорослей [4]. Применение этанола в качестве топлива позволит снизить зависимость от ископаемого топлива. Более того, сжигание этанола не приводит к увеличению содержания парникового газа в атмосфере, а также снижает образование сажи, CO и несгоревшего топлива или частично окисленных углеводородов. Однако имеется тенденция к образованию альдегидов, по данным наблюдений она зависит от структуры топлива и условий сжигания [2, 5]. В настоящее время этанол является одним из наиболее распространенных биотоплив [6–8]. Рис. 1 иллюстрирует масшта-

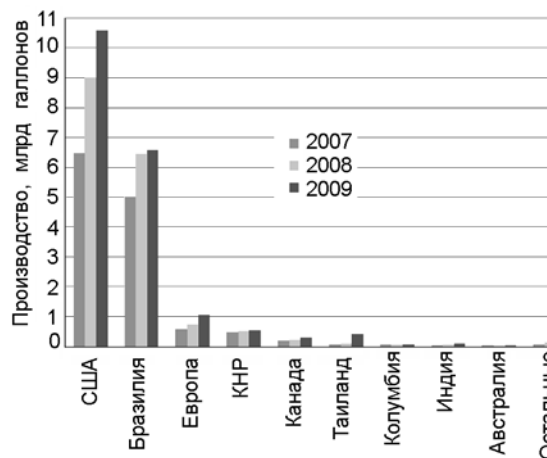


Рис. 1. Производство этанола в качестве топлива отдельными странами

бы его производства в мире в качестве топлива в 2007–2009 гг. [6].

Проведен ряд исследований, направленных на лучшее понимание каждой стадии горения этанола и разработку более точного механизма окисления. Горение этанола изучалось в диффузионных пламенах [9], ламинарных пламенах предварительно перемешанных смесей [10, 11], стационарных реакторах [12] и ударных трубах [13, 14]. Первые кинетические механизмы окисления этанола, разработанные в [15, 16], были основаны на результатах экспериментов в ударных трубах. Применимость ме-

ханизма [17] была проверена в экспериментах в проточном реакторе. Позднее были разработаны кинетические механизмы горения этанола [18–21], согласующиеся с экспериментальными данными, полученными на различных установках, в том числе на плоской горелке [10].

Для дальнейшего развития и улучшения кинетических механизмов необходимы новые экспериментальные данные. Особенно важна проверка применимости механизмов в широком диапазоне условий. К настоящему времени в литературе нет данных по структуре пламен смесей метана с этанолом. Кроме того, очень мало известно об образовании в пламени этанола промежуточных продуктов, содержащих три атома углерода. Для того чтобы заполнить пробел в знании и продвинуться в понимании процессов горения этанола, мы поставили целью данной работы экспериментально исследовать структуру стехиометрического пламени предварительно перемешанной смеси метана с добавкой 30 % этанола при низком давлении. Приведено сравнение этого пламени с пламенами метана и этанола. Использование в работе метанового пламени позволило получить реакционную смесь с высокой молярной долей метильных радикалов, которая имитирует горение более тяжелых углеводородов.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Экспериментальная установка, использованная для измерения структуры одномерного предварительно перемешанного пламени, описана в работах [22, 23]. Установка создана в нашей лаборатории для измерения температуры и профилей концентраций стабильных компонентов пламени и применялась для изучения богатых пламен метана с добавками ненасыщенных предшественников сажи [24–26].

Все пламена стабилизировались на охлаждаемой водой (60 °С) горелке МакКенна диаметром 60 мм, установленной в вакуумной камере при постоянном давлении 50 Торр (6.7 кПа). Камера снабжена пробоотборником с диаметром отверстия 180 мкм. Другие характеристики зонда показаны на рис. 2.

В экспериментах использовался метан чистотой 99.95 % («Альфа-газ — Эр ликвид»), кислород 99.5 % и аргон 99.95 % («Мессер»). Этанол чистотой более 99.5 % («Сигма-Алдрич») содержался в металлическом сосуде под давлением аргона. Для удаления следовых

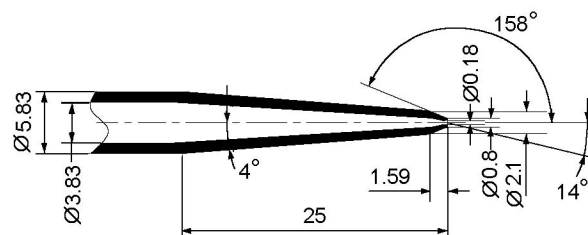


Рис. 2. Схема пробоотборника (размеры указаны в миллиметрах)

количество растворенного кислорода после загрузки этанола в сосуд через него пропускаться аргон и сосуд откачивался. Этанол подавался с помощью регулятора массового расхода для жидкостей, смешивался с аргоном и испарялся при пропускании через регулируемый испаритель и смеситель при температуре 100 °С.

Отобранные продукты анализировали на газовом хроматографе, соединенном с пробоотборником прогреваемой линией. При этом использовались три типа колонок: Carbosphere, HP-Plot U и HP-Molsieve, и два типа детекторов: пламенно-ионизационный и катарометр. Стабильные компоненты пламени анализировали также с помощью хромато-масс-спектрометра. Ошибка в измерении молярных долей основных продуктов находилась в пределах $\pm 5\%$, а компонентов с объемной концентрацией 0.01 % и меньше — $\pm 10\%$. Нижний концентрационный предел пламенно-ионизационного детектора составлял примерно 10^{-6} , катарометра — $5 \cdot 10^{-5}$ (для H_2 и O_2).

Температуру пламен измеряли платинородиевыми термопарами (Pt + 6 % Rh/Pt + 30 % Rh) диаметром 100 и 105 мкм антикаталитического покрытия и при его наличии. Термопара крепилась к держателю и пересекала пламя по горизонтали, чтобы избежать потерь тепла в холодные контакты. Спай термопары находился над центром горелки. Термопара была покрыта инертным слоем $BeO-Y_2O_3$, что предотвращало каталитические эффекты при помещении ее в пламя [27]. Керамический слой наносили путем погружения термопары в расплав $Y_2(CO_3)_3$ и BeO в соотношении 93:7 (по массе) и последующего ее отжига в пламени горелки Мекера. Процедуру повторяли до 10 раз до полного покрытия поверхности. Поправки на потери тепла термопарой за счет излучения определяли компенсационным методом [28]. Ошибка в измерении температуры состав-

Состав горючей смеси

Горючее	Молярная доля				Разбавление, %	C/O	C/H
	C ₂ H ₅ OH	CH ₄	O ₂	Ar			
Этанол	0.06840	0	0.20437	0.72722	78	0.287	0.333
Этанол + метан	0.02072	0.06907	0.20076	0.70945	78	0.262	0.276
Метан	0	0.09910	0.19888	0.70202	78	0.249	0.250

ляла ± 20 К, а смещение профиля температуры в направлении, перпендикулярном поверхности горелки, равнялось ± 0.05 мм. Положение пробоотборника и термопары относительно горелки определяли с помощью катетометра с точностью 0.01 мм.

Составы использованных в экспериментах топлив приведены в таблице. Линейная скорость холодной (20°C) горючей смеси для всех трех пламен у поверхности горелки составляла 57 см/с.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 3, *a* показаны профили температур трех невозмущенных пламен, на рис. 3, *б* —

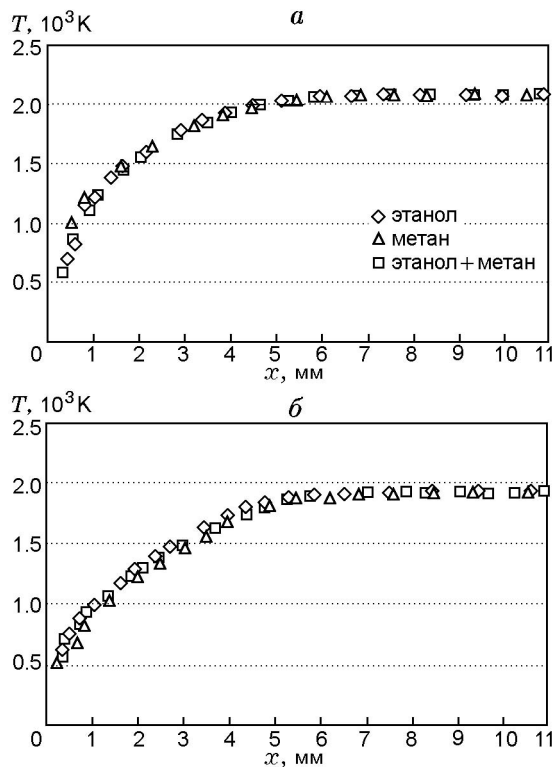


Рис. 3. Профили температуры пламен, измеренные без зонда (*a*) и в присутствии зонда (*б*)

пламен, возмущенных пробоотборником. Видно, что введение пробоотборника в пламя приводит к некоторому понижению измеренной температуры пламени. Температура конечных продуктов сгорания практически одинакова для всех трех пламен.

На рис. 4–8 приведены молярные доли ряда стабильных компонентов трех исследуемых пламен в зависимости от расстояния до горелки (x). Можно утверждать, что во всех пламенах максимум концентрации большинства идентифицированных промежуточных продуктов находится на расстоянии $x = 1 \div 3$ мм от горелки. Некоторое смещение положения максимумов наблюдается только для H_2 , C_2H_4 и C_2H_2 . Основными конечными продуктами сгорания являются CO_2 и H_2O .

Приведенные на рис. 4 профили молярных долей компонентов горючих смесей ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$, CH_4 , Ar , O_2) свидетельствуют о том, что этанол полностью расходуется на расстоянии 2.5 мм (рис. 4, *a*), в то время как метан полностью не сгорает даже на расстоянии 3.5 мм (рис. 4, *б*). Такое различие объясняется тем, что скорость распространения метаноокислородного пламени ниже скорости пламени этанол + кислород [29]. Поэтому при равной линейной скорости горючей смеси у поверхности горелки фронт пламени метана располагается выше над горелкой.

Из рис. 4, *в* видно, что профили молярной доли O_2 в трех пламенах практически не отличаются друг от друга, следовательно, скорость расходования кислорода почти одинакова во всех пламенах. Кроме того, во всех пламенах остается значительная часть непрореагировавшего кислорода. Профили молярной доли аргона во всех пламенах мало отличаются друг от друга.

На рис. 5 приведены профили молярных долей основных компонентов пламен (CO_2 , H_2O , H_2 , CO).

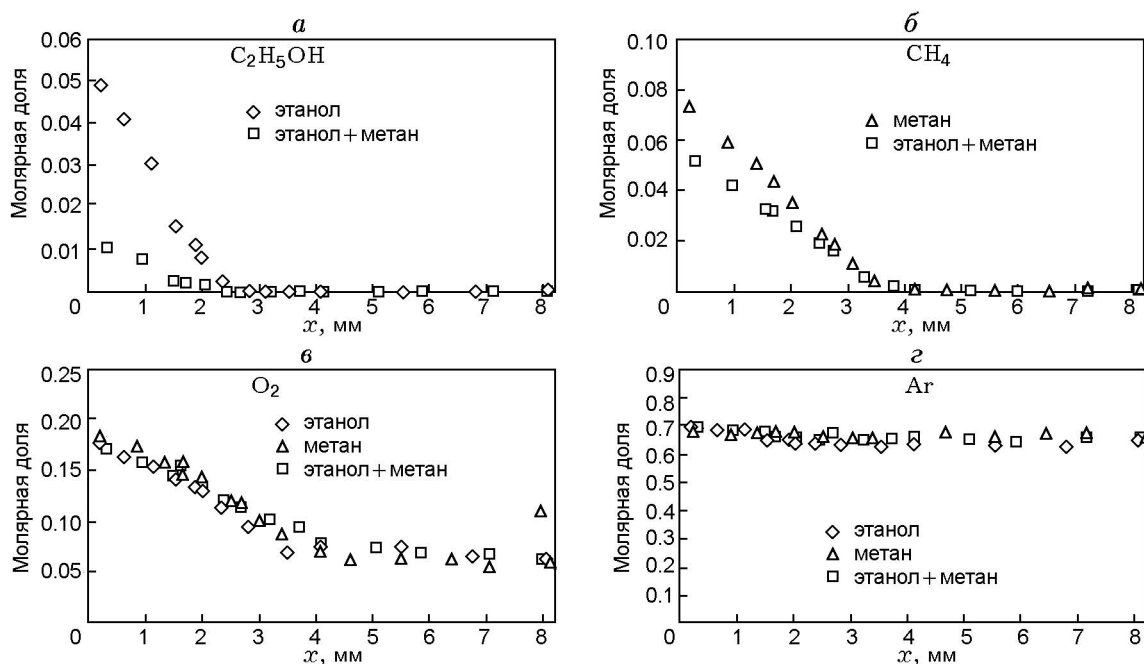
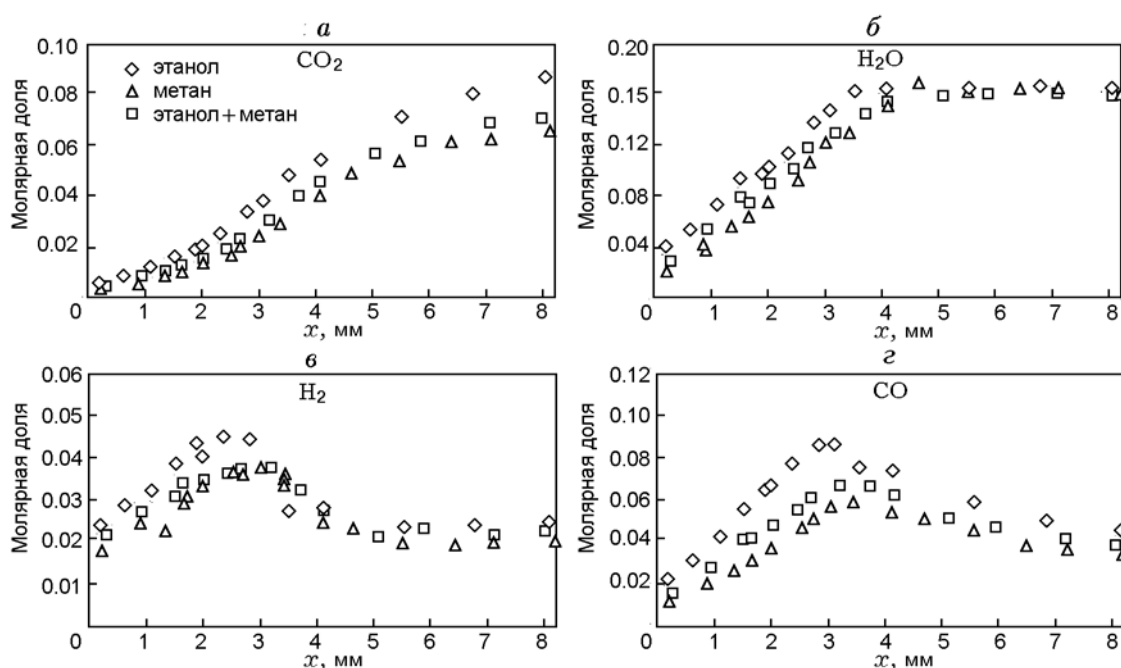


Рис. 4. Профили молярных долей исходных компонентов горючей смеси

Рис. 5. Профили молярных долей основных компонентов пламени (CO_2 , H_2O , H_2 , CO)

Молярная доля CO_2 , который, как известно, вызывает парниковый эффект и выбросы которого в будущем будут контролироваться законодательно, максимальна в пламени этанола и минимальна в метановом пламени, что объясняется наибольшим соотношением C/H в пламени этанола (см. таблицу). Молярные до-

ли воды во всех пламенах отличаются незначительно (рис. 5, б).

В пламени этанола максимум молярной доли H_2 наблюдается на расстоянии $x = 2.5$ мм от горелки, а в пламенах метана и смеси метана с этанолом — на расстоянии $x = 3$ мм. Как видно на рис. 5, в, водород в пламенах не стора-

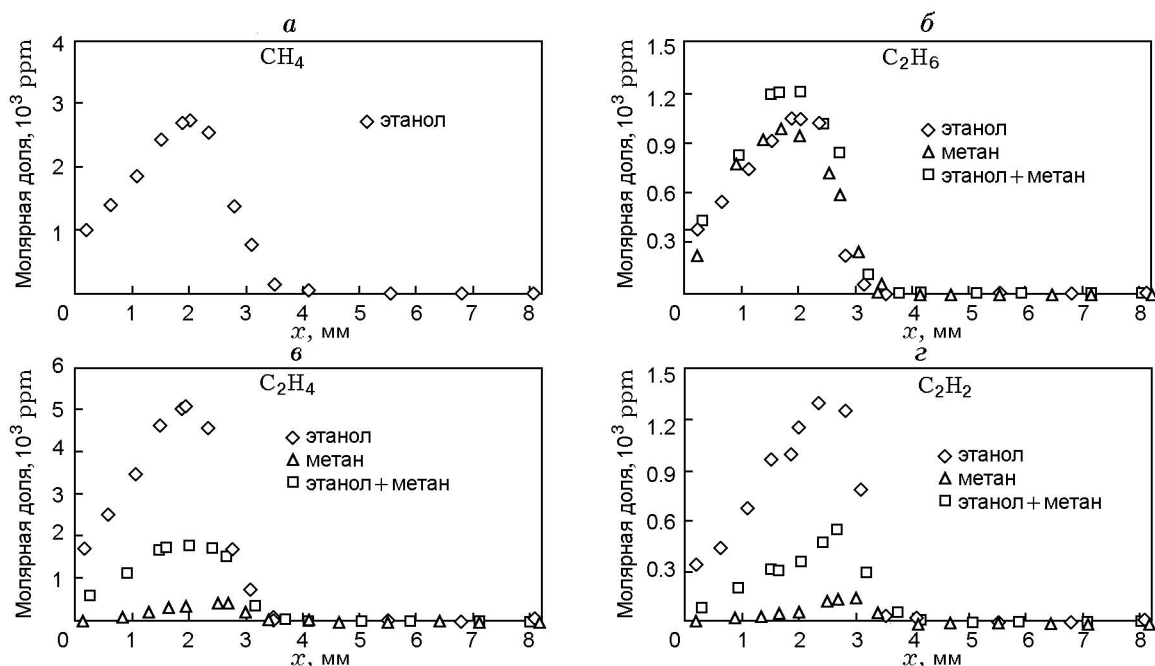


Рис. 6. Профили молярных долей метана и промежуточных продуктов с двумя атомами углерода, образующихся в пламенах

ет полностью и в области продуктов сгорания наблюдается его остаточная концентрация.

В пламенах метана и смеси метана с этанолом молярная доля CO максимальна на расстоянии $x = 3.5$ мм от горелки, в пламени чистого этанола — на расстоянии $x = 3$ мм (рис. 5,г). При этом молярная доля CO в пламенах тем больше, чем выше молярная доля этанола в исходной смеси, что объясняется в основном большим значением отношения C/H в пламени этанола. Образование CO является важной промежуточной стадией окисления горючего: здесь происходит образование CO₂ по реакции $\text{CO} + \text{OH} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}$. Из профилей на рис. 5,г видно, что CO не сгорает полностью.

Профили молярных долей промежуточных продуктов горения CH₄, C₂H₆, C₂H₄ и C₂H₂ показаны на рис. 6.

В пламени этанола метан является промежуточным продуктом, который образуется из метильных радикалов и расходуется в реакциях с ними же. Максимум молярной доли метана обнаружен на расстоянии 2 мм от горелки (0.27 %).

Из компонентов пламени чистого метана с двумя атомами углерода (не содержащих кислорода) наиболее важны этан C₂H₆ и этилен C₂H₄, максимальная молярная доля которых

0.1 и 0.5 %. В пламени метана с добавкой этанола максимальная молярная доля C₂H₄ составляет 0.2 %. В пламенах метана и смеси метана с этанолом первым образуется этан на расстоянии $x \approx 1.8$ мм (рис. 6,б), в то время как этилен первым образуется в пламени этанола на расстоянии $x \approx 2$ мм от горелки (рис. 6,в). Эти различия очень важны, так как связаны с образованием компонентов с двумя атомами углерода. Они имеют следующее объяснение. Из кинетических механизмов для высокотемпературного окисления метана известны два пути его расходования: C₁ и C₂, при этом путь C₁ является основным [30, 31]. Путь C₂ включает рекомбинацию двух радикалов CH₃, в результате которой образуется C₂H₆. При взаимодействии C₂H₆ с H или OH образуется этильный радикал C₂H₅, который гибнет, образуя этилен C₂H₄. Поэтому в пламени метана из всех C₂-продуктов этан присутствует в наибольшей концентрации и образуется первым. В пламени этанола этилен преимущественно образуется непосредственно из этанола в результате реакции $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH} (+\text{M}) \rightarrow \text{C}_2\text{H}_4 + \text{H}_2\text{O} (+\text{M})$ или из гидроксипропилового радикала $\text{CH}_2\text{CH}_2\text{OH}$ по реакции $\text{CH}_2\text{CH}_2\text{OH} (+\text{M}) \rightarrow \text{C}_2\text{H}_4 + \text{OH} (+\text{M})$ [10, 18]. Радикал CH₂CH₂OH образуется из этанола при отрыве атома H.

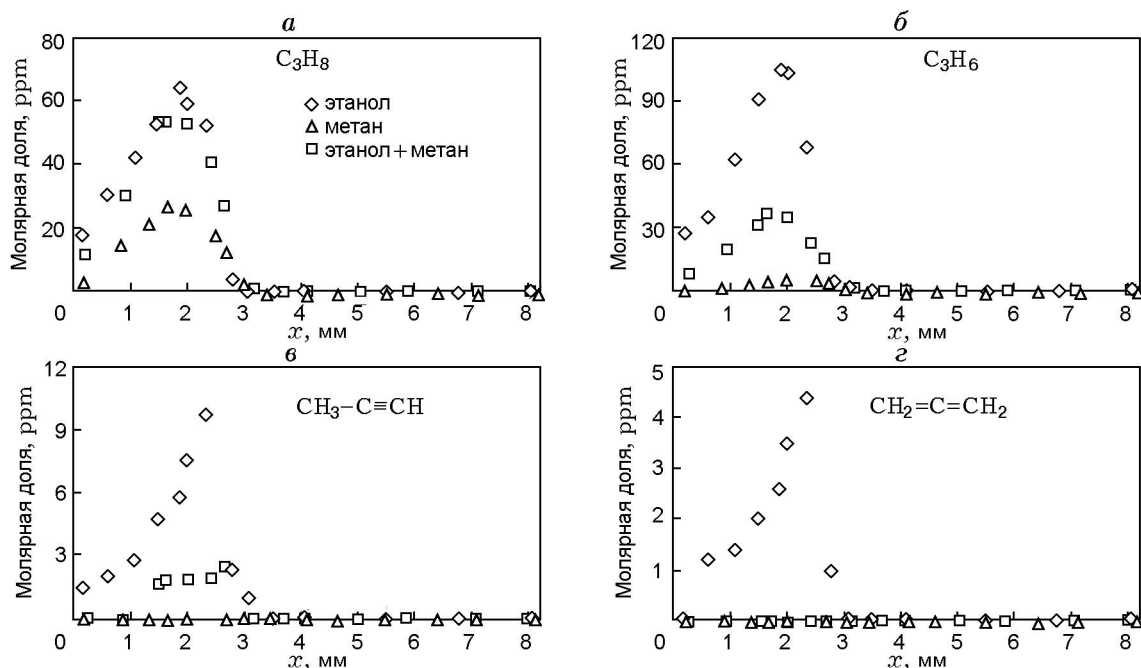


Рис. 7. Профили молярных долей промежуточных продуктов с тремя атомами углерода

Следовательно, в пламени чистого этанола из всех C_2 -соединений (без кислорода) C_2H_4 присутствует в максимальной концентрации, образуясь вблизи поверхности горелки.

Максимальные молярные доли ацетилена C_2H_2 (рис. 6,г) и этилена C_2H_4 (рис. 6,в) значительно выше в пламени метана с этанолом, чем в метановом пламени, и достигают уровня в пламени чистого этанола. Наивысшая молярная доля этана C_2H_6 (рис. 6,б) почти не отличается в пламенах этанола и метана и немного выше в пламени смеси метан + этанол. Близость молярных долей C_2H_6 в пламенах этанола и метана имеет следующее объяснение. Этан образуется в результате рекомбинации двух метильных радикалов. Соотношение C/H в пламени этанола выше, чем в остальных пламенах, что приводит к образованию C_2H_6 в большей концентрации. Однако CH_3 , как известно, является важнейшим промежуточным радикалом при горении метана.

Максимальная молярная доля C_2H_4 меняется в зависимости от отношений C/H и C/O в горючей смеси. Действительно, на рис. 6,в мы наблюдаем снижение максимальных молярных долей этилена: 0.5 % (в пламени этанола), 0.2 % (метан + этанол) и 0.05 % (метан).

Ацетилен рассматривается как наиболее характерный предшественник образования са-

жи среди множества углеводородных топлив, потому что из него образуется бензол, являющийся первым шагом образования сажи [32]. Максимальная молярная доля C_2H_2 также зависит от соотношений C/H и C/O в горючей смеси. Как видно на рис. 6,г, молярная доля ацетилена максимальна в пламени этанола (0.12 %), несколько меньше в пламени метан + этанол (0.055 %) и минимальна в пламени метана (0.015 %).

На рис. 7 показаны профили молярных долей продуктов горения, содержащих три атома углерода: C_3H_8 , C_3H_6 , $CH_3-C\equiv CH$ и $CH_2=C=CH_2$. Видно, что молярная доля соединений C_3 в пламени метана очень мала.

В трех исследованных пламенах молярные доли пропана C_3H_8 и пропилена C_3H_6 достигают максимума на расстоянии $x = 1.8$ мм от горелки, в то время как максимум молярных долей $CH_3-C\equiv CH$ и $CH_2=C=CH_2$ наблюдается на расстоянии $x = 2.5$ мм. В пламени метана эти соединения присутствуют в очень низкой концентрации, при этом молярные доли $CH_3-C\equiv CH$ и $CH_2=C=CH_2$ ниже порога чувствительности хроматографа. Пропилен является важнейшим продуктом горения этанола, содержащим три атома углерода, его максимальная молярная доля достигает 0.0105 %. В пламенах метана и смеси метана с этанолом наибольшая

молярная доля пропилена составляет 0.0026 и 0.0054 % соответственно.

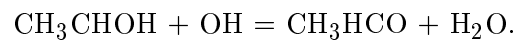
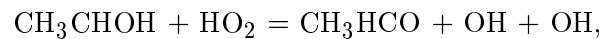
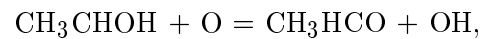
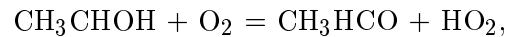
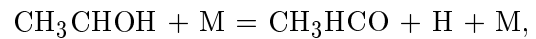
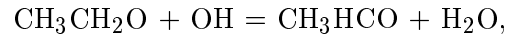
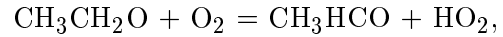
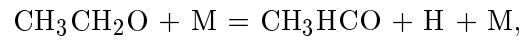
Молярная доля продуктов горения с тремя атомами углерода максимальна в пламени этанола. Она снижается по мере уменьшения содержания этанола в исходной горючей смеси, т. е. зависит от соотношений C/H и C/O в горючих смесях.

На рис. 8 показаны профили молярных долей легких кислородсодержащих продуктов горения — формальдегида CH_2O и ацетальдегида CH_3CHO .

Альдегиды, являющиеся опасными загрязнителями воздуха, быстро образуются в пламенах, и их молярная доля достигает максимума вблизи поверхности горелки: формальдегид — $x = 1.5$ мм (рис. 8, а), ацетальдегид — $x = 1$ мм (рис. 8, б).

Наибольшая молярная доля альдегидов наблюдается в пламени этанола, несколько ниже — в пламени метан + этанол, минимальная — в пламени чистого метана. Ацетальдегид в пламени метана не обнаружен.

В пламени этанола образуются радикалы CH_3CHOH и $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{O}$ путем отрыва от молекулы $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ атома водорода. Они превращаются в ацетальдегид CH_3CHO по следующим реакциям [5, 18, 33]:

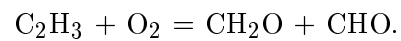
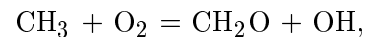
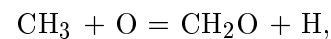


Образование CH_2O также может быть объяснено этой схемой реакций через разрыв связи C—C радикала $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{O}$:



Эти реакционные пути наглядно демонстрируют возможность образования тяжелых альдегидов в пламенах этанола. Полученные результаты подтверждают, что образование ацетальдегида при горении этанола играет важную роль, поскольку он является основным промежуточным продуктом горения этанола (его максимальная молярная доля в пламени 0.75 %).

В пламени метана формальдегид образуется преимущественно из радикалов CH_3 и C_2H_3 [31] по следующим реакциям:



ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе изучена структура трех ламинарных стехиометрических пламен при низком давлении: метана, этанола и предварительно перемешанной смеси метана с 30 % этанола. Измерены профили температуры и молярных долей для 17 стабильных компонентов пламени от C_0 до C_3 , включая два альдегида. Сравнение этих профилей показало, что концентрации всех компонентов, за исключением C_2H_6 , максимальны в пламени этанола, меньше в пламени метан + этанол и минимальны в пламени метана. Анализ реакционных путей расходования топлив с учетом соотношений H/C и C/O в горючих смесях позволил выявить природу различия исследованных

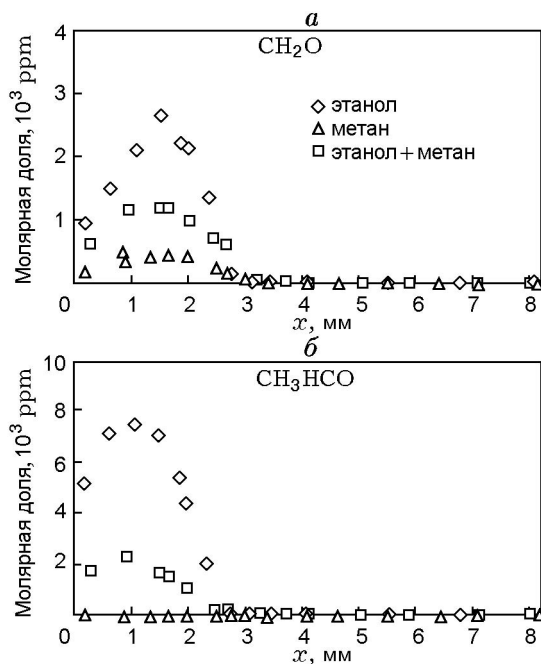


Рис. 8. Профили молярных долей кислородсодержащих промежуточных продуктов

пламен. Несмотря на наличие кислорода в молекуле этанола, в его пламени образуется гораздо больше ненасыщенных углеводородов — предшественников образования сажи и токсичных альдегидов, чем в пламени метана (при этом отношения C/O для обеих горючих смесей близки). Наличие связи C—C в молекуле этанола благоприятствует образованию соединений с двумя и тремя атомами углерода.

Работа выполнена при поддержке Европейской комиссии по программе «Clean ICE» (грант на передовые исследования Европейского совета по науке).

ЛИТЕРАТУРА

1. Yao C., Yang X., Raine R. R., Cheng C., Tian Z., Li Y. The effects of MTBE/ethanol additives on toxic species concentration in gasoline flame // *Energy and Fuels*. — 2009. — V. 23, N 7. — P. 3543–3548.
2. Agarwal A. K. Biofuels (alcohols and biodiesel) applications as fuels for internal combustion engines // *Progr. Energy and Combust. Sci.* — 2007. — V. 33, N 3. — P. 233–271.
3. He J., Zhang W. Techno-economic evaluation of thermo-chemical biomass-to-ethanol // *Appl. Energy*. — 2011. — V. 88, N 4. — P. 1224–1232.
4. John R. P., Anisha G. S., Nampoorthi K. M., Pandey A. Micro and macroalgal biomass: A renewable source for bioethanol // *Bioresour. Technol.* — 2011. — V. 102, N 1. — P. 186–193.
5. Frassoldati A., Faravelli T., Ranzi E., Kohse-Höinghaus K., Westmoreland P. R. Kinetic modeling study of ethanol and dimethyl ether addition to premixed low-pressure propene-oxygen-argon flames // *Combust. Flame*. — 2011. — V. 158, N 7. — P. 1264–1276.
6. U. S. Department of Energy, «AFDC Ethanol: Ethanol Production». — <http://www.afdc.energy.gov/afdc/ethanol/production.html>. [Accessed: 07-mai-2011].
7. Balat M., Balat H., Öz C. Progress in bioethanol processing // *Progr. Energy and Combust. Sci.* — 2008. — V. 34, N 5. — P. 551–573.
8. Service R. F. Biofuel researchers prepare to reap a new harvest // *Science*. — 2007. — V. 315, N 5818. — P. 1488–1491.
9. Smith S. R., Gordon A. S. Studies of diffusion flames. II. Diffusion flames of some simple alcohols // *J. Phys. Chem.* — 1956. — V. 60, N 8. — P. 1059–1062.
10. Leplat N., Dagaut P., Togbé C., Vandooren J. Numerical and experimental study of ethanol combustion and oxidation in laminar premixed flames and in jet-stirred reactor // *Combust. Flame*. — 2011. — V. 158, N 4. — P. 705–725.
11. Leplat N., Seydi A., Vandooren J. An experimental study of the structure of a stoichiometric ethanol/oxygen/argon flame // *Combust. Sci. Technol.* — 2008. — V. 180, N 3. — P. 519–532.
12. Brown J., Tipper C. F. H. The cool flame combustion of ethanol // *Proc. Roy. Soc. London. A. Math. and Phys. Sci.* — 1969. — V. 312, N 1510. — P. 399–415.
13. Cooke D. F., Dodson M. G., Williams A. A shock-tube study of the ignition of methanol and ethanol with oxygen // *Combust. Flame*. — 1971. — V. 16, N 3. — P. 233–236.
14. Tsang W. Thermal stability of alcohols // *Intern. J. Chem. Kinetics*. — 1976. — V. 8, N 2. — P. 173–192.
15. Natarajan K., Bhaskaran K. A. An experimental and analytical investigation of high temperature ignition of ethanol // *Intern. Symp. on Shock Tubes and Waves*. — 1981. — V. 13. — P. 834–842.
16. Dunphy M. P., Patterson P. M., Simmie J. M. High-temperature oxidation of ethanol. Part 2. Kinetic modelling // *J. Chem. Soc., Faraday Trans.* — 1991. — V. 87, N 16. — P. 2549.
17. Norton T. S., Dryer F. L. An experimental and modeling study of ethanol oxidation kinetics in an atmospheric pressure flow reactor // *Intern. J. Chem. Kinetics*. — 1992. — V. 24, N 4. — P. 319–344.
18. Marinov N. M. A detailed chemical kinetic model for high temperature ethanol oxidation // *Intern. J. Chem. Kinetics*. — 1999. — V. 31, N 3. — P. 183–220.
19. Saxena P., Williams F. A. Numerical and experimental studies of ethanol flames // *Proc. Combust. Inst.* — 2007. — V. 31, N 1. — P. 1149–1156.
20. Li J., Kazakov A., Chaos M., Dryer F. L. Chemical kinetics of ethanol oxidation // 5th US Combustion Meeting, organized by the Western States Section of the Combustion Institute and hosted by the University of California at San Diego, March 25–28, 2007. — http://www.princeton.edu/~combust/meetings/JSSCI%20UCSD/Li_et_al_5th_JMUSSCLpaper_C26.pdf.
21. Cancino L. R., Fikri M., Oliveira A. A. M., Schulz C. Measurement and chemical kinetics modeling of shock-induced ignition of ethanol — air mixtures // *Energy and Fuels*. — 2010. — V. 24, N 5. — P. 2830–2840.
22. Пусс Э., Глод П. А., Фурне Р., Баттэн-Леклерк Ф. Экспериментальное исследование структуры пламени бедной предварительно перемешанной смеси индан/CH₄/O₂/Ar // *Физика горения и взрыва*. — 2010. — Т. 46, № 2. — С. 132–139.
23. Pousse E., Glaude P. A., Fournet R., Battin-Leclerc F. A lean methane premixed laminar flame doped with components of diesel

- fuel. I. *n*-Butylbenzene // Combust. Flame. — 2009. — V. 156, N 5. — P. 954–974.
24. **Gueniche H., Glaude P., Dayma G., Fournet R., Battin-Leclerc F.** Rich methane premixed laminar flames doped with light unsaturated hydrocarbons. I. Allene and propyne // Combust. Flame. — 2006. — V. 146, N 4. — P. 620–634.
25. **Gueniche H., Glaude P., Dayma G., Fournet R., Battin-Leclerc F.** Rich premixed laminar methane flames doped by light unsaturated hydrocarbons. II. 1,3-Butadiene // Combust. Flame. — 2007. — V. 151, N 1–2. — P. 245–261.
26. **Gueniche H., Glaude P., Dayma G., Fournet R., Battin-Leclerc F.** Rich methane premixed laminar flames doped by light unsaturated hydrocarbons. III. Cyclopentene // Combust. Flame. — 2008. — V. 152, N 1–2. — P. 245–261.
27. **Kint J. H.** A noncatalytic coating for platinum-rhodium thermocouples // Combust. Flame. — 1970. — V. 14, N 2. — P. 279–281.
28. **Bonne U., Grewer T., Wagner A. A. M.** Messungen in der Reaktionszone von Wasserstoff — Sauerstoff — und Methan — Sauerstoff — Flammen // Z. für Phys. Chemie. — 1960. — Bd 26. — S. 93–110.
29. **Chong C. T., Hochgreb S.** Measurements of laminar flame speeds of acetone/methane/air mixtures // Combust. Flame. — 2011. — V. 158, N 3. — P. 490–500.
30. **Dupont V., Williams A.** NO_x mechanisms in rich methane-air flames // Combust. Flame. — 1998. — V. 114, N 1–2. — P. 103–118.
31. **Li S. C., Williams F. A.** NO_x formation in two-stage methane-air flames // Combust. Flame. — 1999. — V. 118, N 3. — P. 399–414.
32. **Xu F., Lin K. C., Faeth G. M.** Soot formation in laminar premixed methane/oxygen flames at atmospheric pressure // Combust. Flame. — 1998. — V. 115, N 1–2. — P. 195–209.
33. **Hartmann D., Karthäuser J., Sawerysyn J. P., Zellner R.** Kinetics and HO₂ product yield of the reaction C₂H₅O + O₂ between 295 and 411 K // Ber. der Bunsen-Gesellschaft für Physikalische Chemie. — 1990. — Bd 94, N 6. — S. 693–645.

*Поступила в редакцию 1/X 2011 г.,
в окончательном варианте — 11/VIII 2012 г.*
