

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ПЛАМЕНИ БЕДНОЙ ПРЕДВАРИТЕЛЬНО ПЕРЕМЕШАННОЙ СМЕСИ ИНДАН/CH₄/O₂/Ar

Э. Пусс, П. А. Глод, Р. Фурне, Ф. Баттэн-Леклерк

Отделение химической физики реакций, UMR 7630 CNRS, Университет Нанси, Нанси, Франция
pierre-alexandre.glaude@ensic.inpl-nancy.fr

С целью исследования механизма химических превращений, имеющих место при горении компонентов дизельного топлива, изучена структура ламинарного пламени бедной предварительно перемешанной смеси метана и воздуха с добавкой индана. Молярный состав горючей смеси: 7.1 % метана, 36.8 % кислорода и 0.90 % индана, что соответствовало коэффициенту избытка горючего 0.74 и соотношению C₉H₁₀/CH₄, равному 12.75 %, в качестве газа-разбавителя использовался аргон. Пламя стабилизировалось на горелке при давлении 6.7 кПа, скорость газа на выходе из горелки составляла 49.2 см/с при температуре 333 К. Измерены концентрации основных продуктов сгорания метана C₀—C₂, 11 углеводородов C₃—C₅, 3 кислородсодержащих соединений C₁—C₃, а также 17 ароматических соединений, а именно: бензол, толуол, фенил-ацетилен, стирол, этилбензол, ксилолы, триметилбензолы, этилтолуолы, инден, метилиндан, метилинден, нафталин, фенол, бензальдегид, бензофуран. Измерения температуры в пламени выполнялись термопарой PtRh(6 %)-PtRh(30 %), установленной внутри камеры сгорания. Измеренные значения температуры лежали в пределах от 800 К (вблизи поверхности горелки) до 2000 К (в продуктах сгорания).

Ключевые слова: смесь метан/кислород/индан, ламинарное пламя, состав продуктов горения.

ВВЕДЕНИЕ

Существует большое количество детальных кинетических моделей окисления горючих смесей, таких как легкие автомобильные топлива (бензин). Однако моделей окисления дизельных топлив существенно меньше, что обусловлено гораздо более сложным составом этих топлив. Компоненты дизельного топлива содержат 10 ÷ 20 атомов углерода. Около 30 % (по массе) из них — алканы, остальная часть — это в основном алкилциклогексаны (24 %), алкилдекалины (15 %), алкилбензолы (10 %), инданы (7 %) и полициклические нафтоароматические соединения [1]. Если окисление алканов изучалось достаточно широко, то существующих на данный момент моделей окисления веществ, принадлежащих к другим химическим группам, существенно меньше, а для замещенных циклоалканов и ароматических соединений (за исключением толуола [2]) вообще известно всего несколько моделей. Окисление алкилбензолов с алкильными

ми боковыми цепями от C₂ до C₄ изучалось в проточном реакторе в Принстоне [3–5], окисление *n*-пропилбензола — в реакторе со струйным перемешиванием в Орлеане [6]. Самовоспламенение алкилбензолов (толуола, ксилолов, этилбензола, триметилбензолов, пропилбензола, этилтолуолов и бутилбензола) исследовалось на установке быстрого сжатия в Лилле [7, 8]. Окисление индана изучалось только в экспериментах с реактором со струйным перемешиванием [9] в Орлеане. Данные измерений в пламени для этого соединения в литературе отсутствуют.

Целью настоящей работы является экспериментальное исследование структуры пламени предварительно перемешанной смеси метана и воздуха с добавлением индана. Выбор именно метанового пламени, а, например, не водородного или пламени углеводородов C₂ обусловлен тем, что в нем концентрация метильных радикалов достаточно высока, что также характерно для горючих смесей, содержащих тяжелые углеводороды. Процессы, происходящие в HCCI-двигателях (HCCI — homogenous charge compression ignition — воспламенение гомогенного заряда в результате

E. Pousse, P. A. Glaude, R. Fournet, F. Battin-Leclerc.
Département de Chimie-Physique des Réactions, UMR
7630 CNRS Nancy Université, 54001 Nancy, France.

сжатия), разработка которых сейчас активно ведется, протекают в условиях обеднения горючим, поэтому, чтобы в какой-то степени описать химию превращений в таких условиях, в данной работе исследовалось бедное пламя метана. Полученные результаты будут в дальнейшем использованы для разработки нового механизма окисления индана на основе накопленного авторами опыта моделирования реакций алканов [10] и легких ароматических соединений (бензола [11] и толуола [12]).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ МЕТОДИКА

Эксперименты проводились на установке, разработанной в нашей лаборатории для измерения профилей температуры и концентрации стабильных веществ в ламинарных, предварительно перемешанных плоских пламенах при низком давлении. На этой установке недавно получены данные для богатых метановых пламен с добавками легких ненасыщенных предшественников сажи [13–15]. Результаты измерений, представленные в настоящей работе для пламени метана, находятся в согласии с результатами [13]. Схема экспериментальной установки показана на рис. 1.

Плоская горелка (McKenna Products), на которой стабилизировалось исследуемое пламя, выполнена из нержавеющей стали, ее внешний диаметр 120 мм, высота 60 мм (не считая размеров подводящих трубок для газов и воды). Горелка оснащена диском из пористой бронзы (95 % меди и 5 % олова) диаметром 60 мм. Внутри этого диска встроен змеевик водяного охлаждения (температура воды поддерживалась равной 333 К) для обеспечения стабилизации пламени. Конструкцией горелки предусмотрена возможность включения спутного кольцевого потока аргона для улучшения стабильности пламени.

Горелка была горизонтально размещена внутри вакуумной камеры с водяным охлаждением. Камера откачивалась двумя форвакуумными насосами. Давление в ней поддерживалось равным 6.7 кПа с помощью клапана регулирования давления. Камера оснащена четырьмя кварцевыми окнами и датчиком давления (MKS, 0 ÷ 100 Торр). Внутри нее располагались микросонд для отбора пробы и термopара. Предусмотрено также вертикальное размещение горелки в камере, в то время как сама камера и ее оборудование сохраняли неизменное положение. Положение горелки отно-

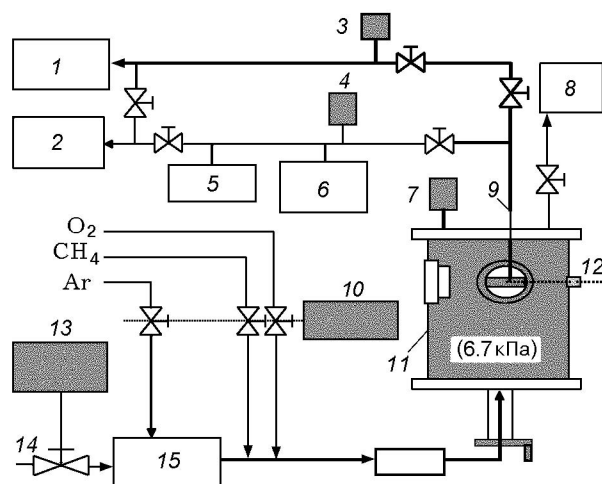


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для исследования ламинарных пламен предварительно перемешанных смесей при низком давлении:

жирными линиями показаны прогреваемые контуры; 1 — хроматограф, 2 — турбомолекулярный насос, 3 — высокотемпературный датчик давления, 4 — датчики давления, 5 — петля из пирекса для сбора пробы, 6 — ртутная колонка, 7 — датчик давления, 8 — форвакуумный насос, 9 — кварцевый пробоотборник, 10 — регулятор массового расхода газов, 11 — камера сгорания (6.7 кПа), 12 — термopара, 13 — регулятор массового расхода жидкости, 14 — жидкое горючее, 15 — камера смешивания и испарения

сительно пробоотборника или термopары контролировалось и измерялось с помощью визирной трубы с точностью 0.01 мм. Поджиг пламени осуществлялся электрическим разрядом.

Потоки газов задавались и регулировались посредством регуляторов массового расхода RDM 280 Alphagaz and Bronkhorst (El-Flow). Метан (чистотой 99.95 %) был поставлен компанией «Alphagaz — Air Liquide», кислород (чистотой 99.5 %) и аргон (чистотой 99.995 %) — компанией «Messer», жидкий индан (чистотой 99 %) — компанией «Alfa Aesar». Жидкий индан содержался в стеклянном сосуде, находящемся под давлением аргона. После каждой заправки сосуда инданом через него барботировали аргон, затем его вакуумировали для устранения растворенного кислорода. Расход жидкого индана задавался и контролировался регулятором массового расхода жидкостей. Жидкий индан смешивался с газом-носителем, затем эта смесь пропусклась через одноходовой теплообменник для испарения жидкости. Температура теплообмен-

ника задавалась выше температуры кипения индана. Поток газа-носителя задавался и контролировался регулятором массового расхода газа, расположенного перед смесительной камерой.

Для получения профилей температуры использовалась PtRh(6 %)-PtRh(30 %)-термопара типа В, выполненная из проволоки диаметром 200 мкм. Термопара была натянута и закреплена на вилкообразном держателе. Во избежание потерь за счет теплопроводности ее располагали в пламени горизонтально. Спай термопары был размещен над центром горелки. Термопара покрыта инертным слоем ВеО— Y_2O_3 для предотвращения каталитических эффектов на ее поверхности [16]. Покрытие нанесено путем смачивания горячим раствором $Y_2(CO_3)_3$ (93 % по массе) и ВеО (7 % по массе) с последующим высушиванием в пламени на горелке Мекера. Эта процедура повторялась (около десяти раз) до тех пор, пока поверхность термопары полностью не покрывалась слоем. Учет потерь термопары на излучение проводился с применением электрического компенсационного метода [17].

Пробоотборник был выполнен из кварца и имел отверстие диаметром $d_i \approx 50$ мкм. Угол раствора пробоотборника около 20° . При проведении измерений температуры в пламенах, возмущенных пробоотборником, расстояние между спаем термопары и кончиком пробоотборника выбрано равным $2d_i$, т. е. ≈ 100 мкм. Кварцевый пробоотборник был непосредственно соединен с прогреваемым трубопроводом, температура которого поддерживалась равной 423 К. На этом трубопроводе устанавливался прогреваемый датчик давления (MKS, 0 ÷ 100 Торр). Через прогреваемые вентили трубопровод был соединен с турбомолекулярным насосом, с линией из пирекса и с прогреваемой петлей из нержавеющей стали, расположенной внутри хроматографа. Давление в трубопроводе всегда поддерживалось ниже 1.3 кПа, образующийся перепад давлений на входе в пробоотборник обеспечивал замораживание реакций. Для анализа соединений, более тяжелых, чем C_6 , ввод пробы в хроматограф осуществлялся через прогреваемый трубопровод.

Анализ пробы проводился двумя методами.

1. Отобранная проба подавалась через линию из пирекса в объем, предварительно откачанный турбомолекулярным насосом до да-

вления 10^{-7} кПа, пока давление в нем не достигало 1.3 кПа (давление в линии до сжатия измерялось датчиком MKS с диапазоном 0 ÷ 10 Торр, а после сжатия — датчиком MKS 0 ÷ 1000 Торр). После увеличения давления пробы примерно в 5 раз она с помощью ртутной колонки поступала в петлю из пирекса. Для анализа O_2 , H_2 , CO и CO_2 с помощью детектора по теплопроводности и анализа C_2H_2 , C_2H_4 , C_2H_6 посредством пламеионизационного детектора применялся хроматограф с колонкой, наполненной Carbosphere. В качестве газа-носителя использовался гелий или аргон. Во-первых определялась с помощью детектора по теплопроводности, однако ее количественный анализ не проводился. Калибровка по измеряемым компонентам выполнялась путем анализа набора проб с известным парциальным давлением соответствующего компонента, по отношению которого к общему давлению в петле определялась молярная доля компонента в пробе. Этот метод позволяет провести анализ тяжелых углеводородов (от аллена до толуола) с помощью хроматографа с колонкой, имеющей наполнитель Nayser, с использованием пламеионизационного детектора и азота в качестве газа-носителя, аналогично тому, как это было сделано нами в предыдущей работе [15]. Однако позднее мы пришли к выводу, что для проведения более точного и более быстрого анализа следует использовать второй метод (см. ниже). Было установлено, что результаты измерения этих соединений, полученные при применении сначала одного, а затем другого метода, очень хорошо согласуются между собой.

2. Отобранная проба подавалась в петлю, расположенную внутри хроматографа и предварительно откачанную турбомолекулярным насосом до 10^{-7} кПа. После заполнения петли до давления 1.3 кПа ее содержимое анализировалось с применением пламеионизационного детектора и гелия в качестве газа-носителя, при этом использовалась капиллярная колонка HP-Plot Q или HP-1. Этот метод применялся для проведения анализа метана и всех углеводородов начиная от C_3 и окисгенированных продуктов, за исключением оксидов углерода.

Погрешность измерения концентраций веществ, по оценкам, составляла примерно $\pm 5\%$ для основных углеводородных соединений и $\pm 10\%$ для кислорода, водорода, оксидов углерода и малозначительных углеводородных продуктов. Предел чувствительности пламеиони-

зационного детектора около 2 ppm, а детектора по теплопроводности — 10 ppm.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Ламинарное плоское пламя предваритель-

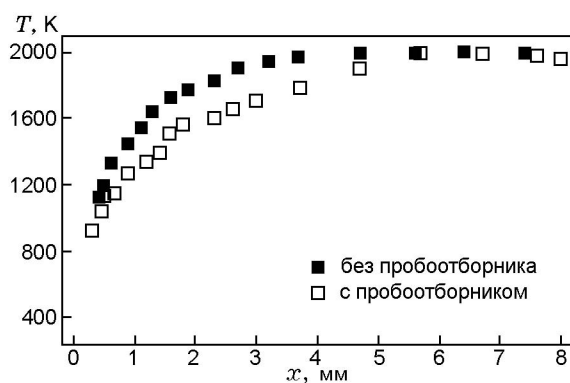


Рис. 2. Профили температуры, измеренные в присутствии пробирки и без него

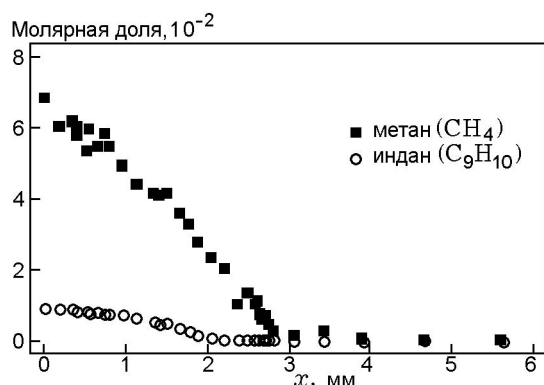


Рис. 3. Профили концентраций исходных углеводородных соединений

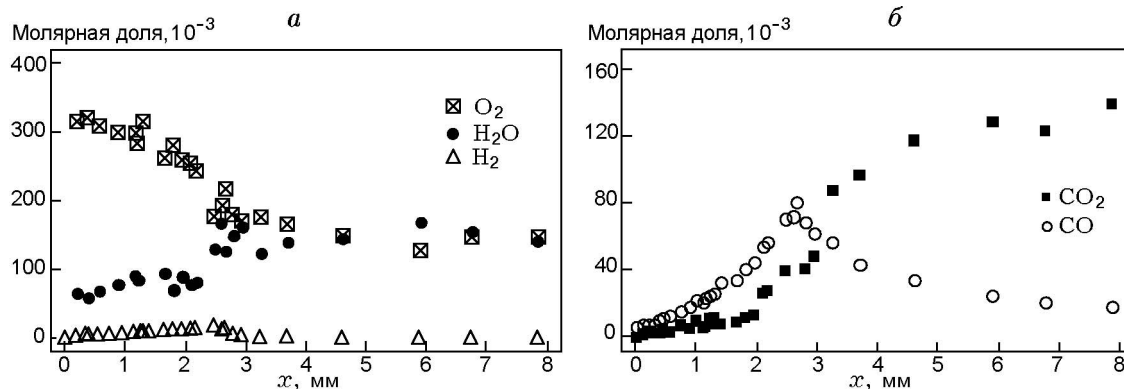


Рис. 4. Профили концентраций кислорода, водорода и основных кислородсодержащих продуктов сгорания

но перемешанной смеси стабилизировалось на горелке при давлении 6.7 кПа (50 Торр). Расход горючей смеси через горелку составлял 5.44 л/мин, что соответствовало линейной скорости газа у поверхности горелки 49.2 см/с при 340 К. Молярный состав горючей смеси (7.1 % метана, 36.8 % кислорода и 0.90 % индана) соответствовал коэффициенту избытка горючего 0.74.

На рис. 2 изображены профили температуры, измеренные в присутствии пробирки и без него. Видно, что введение в пламя пробирочного зонда приводит к уменьшению температуры пламени, т. е. пробирочник вносит тепловые возмущения. В случае, когда пробирочник не внесен в пламя, минимальная температура, которую удалось измерить в пламени, составила ≈ 1115 К (на расстоянии от поверхности горелки $x = 0.4$ мм). Более низкие значения температуры измерить не удалось из-за большого диаметра термометра. Максимальная температура в пламени, как видно, достигается на расстоянии $x = 6$ мм от поверхности горелки и составляет 1995 К.

На рис. 3 представлены профили концентраций метана и индана. Видно, что индан полностью расходуется уже на расстоянии $x = 2$ мм от поверхности горелки, тогда как зона расходования метана продолжается до $x = 3$ мм.

На рис. 4 приведены профили концентраций кислорода, водорода, воды (рис. 4, а) и оксидов углерода (рис. 4, б) в пламени. Молярная доля воды определена из материального баланса по другим основным веществам. Как видно, в этом пламени профили водорода и моноокси-

да углерода имеют характерный максимум на расстоянии $x = 2.5$ мм от поверхности горелки, при этом основными конечными продуктами являются только диоксид углерода и вода.

На рис. 5 изображены профили концентраций углеводородов C_2 . Как видно, преобладает ацетилен (максимальная молярная доля

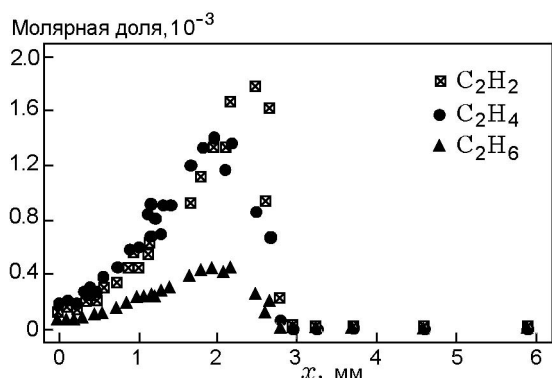


Рис. 5. Профили концентраций соединений C_2

1800 ppm), при этом среди измеренных компонентов он образуется последним. Его максимальная концентрация достигается на расстоянии 2.5 мм от горелки. Этилена образуется немного меньше, чем ацетилена. Максимумы концентраций этилена и этана зарегистрированы на расстоянии 2 мм от горелки.

На рис. 6 показаны профили концентраций измеренных углеводородов C_3 . Пропен и пропан (рис. 6, а) имеют максимумы концентрации на расстоянии $x = 2$ мм от поверхности горелки, аллен и пропиен (рис. 6, б) — на расстоянии $x \approx 2.2$ мм. Максимальная молярная доля пропена (80 ppm), как показали измерения, близка по значению к тем, что наблюдаются для пропиена и аллена, и более чем на порядок превышает максимальную молярную долю пропана.

На рис. 7 представлены профили концентраций углеводородов C_4 . В первую очередь образуются бутены (рис. 7, а), максимальная концентрация которых достигается на расстоянии $x \approx 1.9$ мм от горелки. Профили концен-

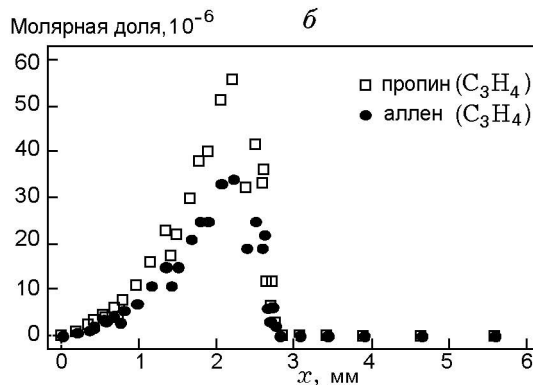
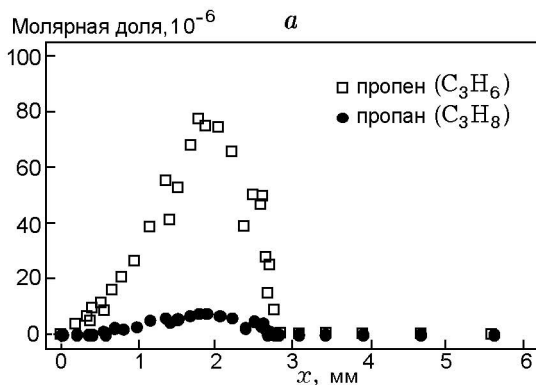


Рис. 6. Профили концентраций соединений C_3

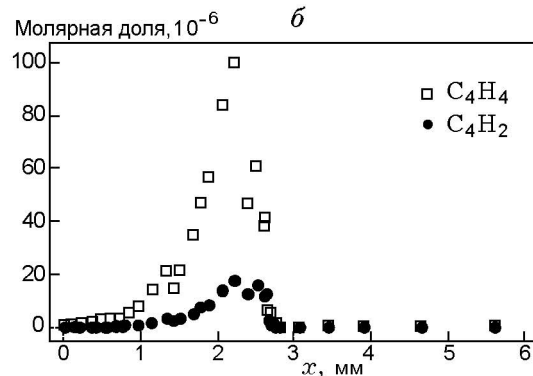
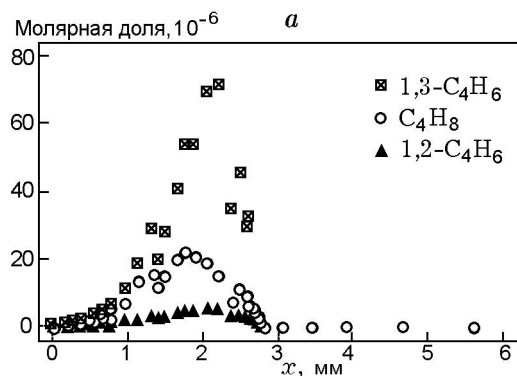


Рис. 7. Профили концентраций соединений C_4

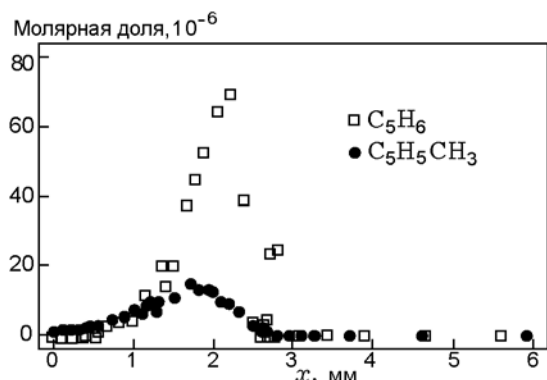


Рис. 8. Профили концентраций циклопентадиена и метилциклопентадиена

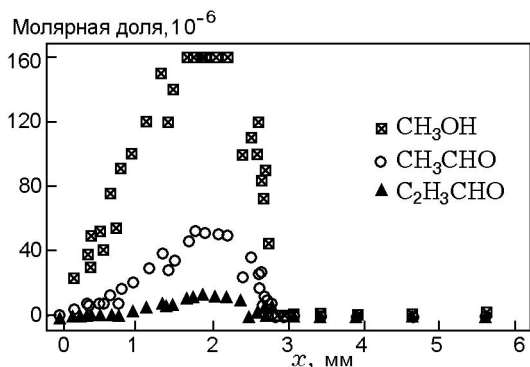


Рис. 9. Профили концентраций кислородсодержащих соединений C_1 — C_3

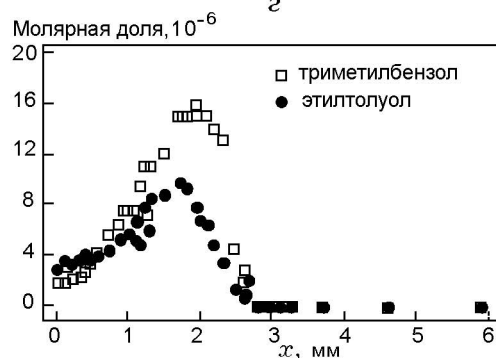
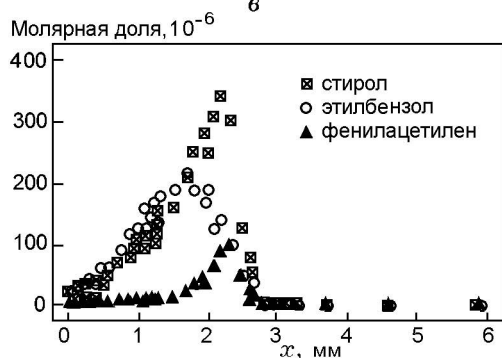
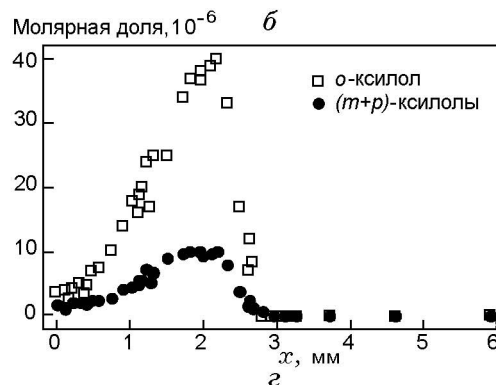
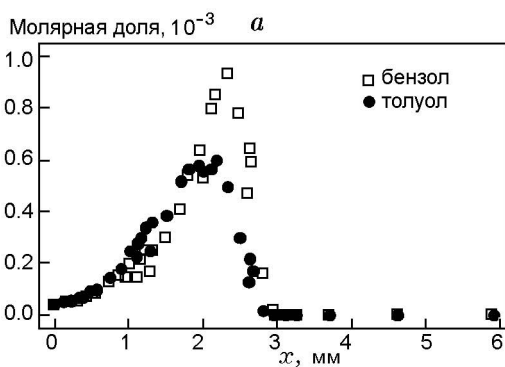


Рис. 10. Профили концентраций моноароматических соединений C_6 — C_{10}

траций диацетилен, винилацетилен и бутадиенов (рис. 7, б) имеют максимумы при $x \approx 2.2$ мм. Из всех соединений C_4 преобладают винилацетилен и 1,3-бутадиен, максимальные молярные доли которых составляют 70 и 100 ppm соответственно.

На рис. 8 приведены профили концентраций циклопентадиена (C_5H_6) и метилциклопентадиена ($C_5H_5CH_3$). Максимальная молярная доля метилциклопентадиена достигается на расстоянии $x \approx 1.8$ мм от горелки, а циклопентадиена — на расстоянии $x \approx 2.2$ мм. Максимальная молярная доля циклопентадиена составляет 70 ppm.

На рис. 9 изображены профили концентраций легких окисгенированных соединений, таких как метанол, ацетальдегид и акролеин, которые являются промежуточными продуктами горения метана. Максимальные концентрации метанола и ацетальдегида соответственно 160 и 60 ppm, и они достигаются на расстоянии от горелки $x \approx 1.9$ мм. Максимум молярной доли акролеина определен при $x \approx 2.1$ мм.

Профили концентраций моноциклических ароматических продуктов представлены на рис. 10. Ближе всего к горелке ($x \approx 1.8$ мм) находятся максимумы концентраций этилбензола (рис. 10, в) и этилтолуола (рис. 10, г). Немного дальше от нее, $x \approx 2.0$ мм, максимальные

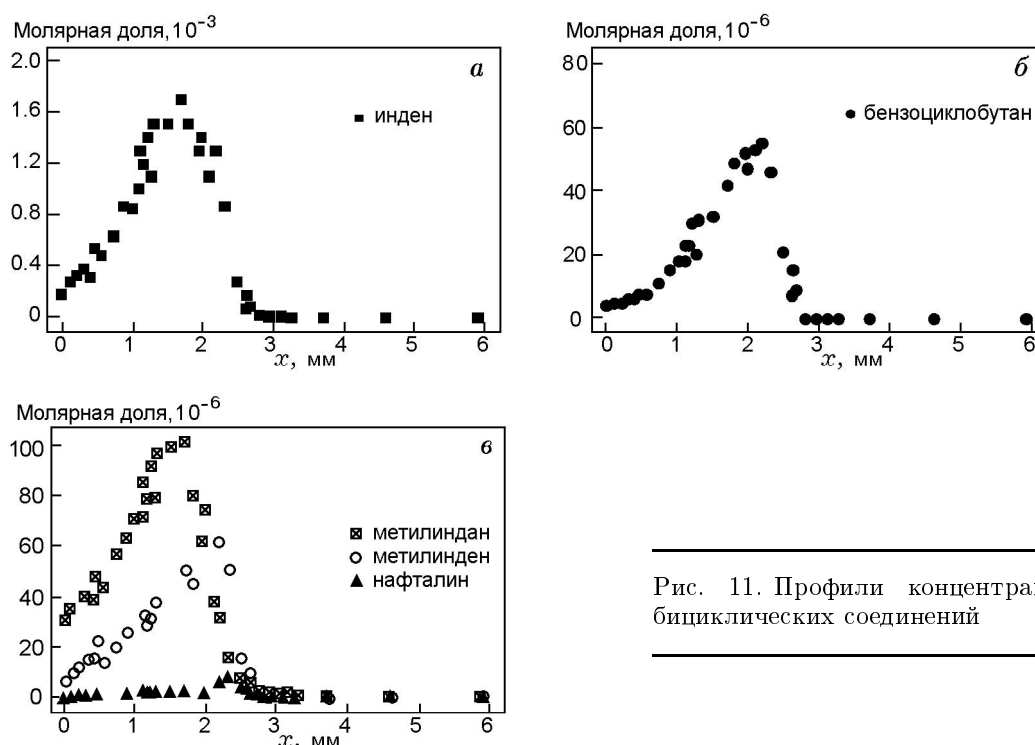


Рис. 11. Профили концентраций бициклических соединений

концентрации имеют толуол (рис. 10, *a*), ксилолы (рис. 10, *б*) и триметилбензол (рис. 10, *в*). Наконец, максимальные молярные доли бензола (рис. 10, *a*), стирола и фенилацетилена (рис. 10, *в*) достигаются на расстоянии $x \approx 2.3$ мм. Из этих соединений преобладают бензол и толуол, их максимальные концентрации соответственно 900 и 600 ppm. Несколько в меньшем количестве образуются стирол (250 ppm в максимуме), этилбензол (200 ppm) и фенилацетилен (100 ppm).

На рис. 11 представлены профили концентраций бициклических ароматических соединений. На расстоянии от горелки $x \approx 1.7$ мм зафиксированы максимумы концентраций индена (рис. 11, *a*) и метилиндана (рис. 11, *в*), на расстоянии $x \approx 2.2$ мм — максимумы концентраций метилиндена (рис. 11, *в*) и бензоциклобутана (рис. 11, *б*). Максимальная молярная доля нафталина (рис. 11, *в*) достигается при $x \approx 2.3$ мм. Среди этих соединений количественно преобладает инден. Из всех зарегистрированных в этом пламени углеводородов C_{2+} инден — основной интермедиат, его максимальная концентрация 1 600 ppm.

Наконец, на рис. 12 показаны профили концентраций окисгенированных ароматических соединений. Из всех этих соединений больше всего образуется бензальдегида, его макси-

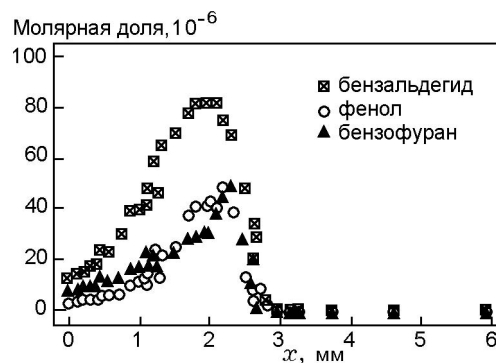


Рис. 12. Профили концентраций ароматических кислородсодержащих соединений

мальная концентрация 80 ppm достигается на расстоянии 2.0 мм от горелки. Профиль концентрации фенола проходит максимум при $x \approx 2.2$ мм, а бензофурана — при $x \approx 2.3$ мм.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

На рис. 13 представлены основные пути реакций при окислении индана в пламени. Наблюдения показывают, что при добавлении индана в пламени образуются в достаточно больших количествах ацетилен, этилен, инден, бензол, толуол, стирол, этилбензол, фенилацетилен, ортоксилол и бензоцик-

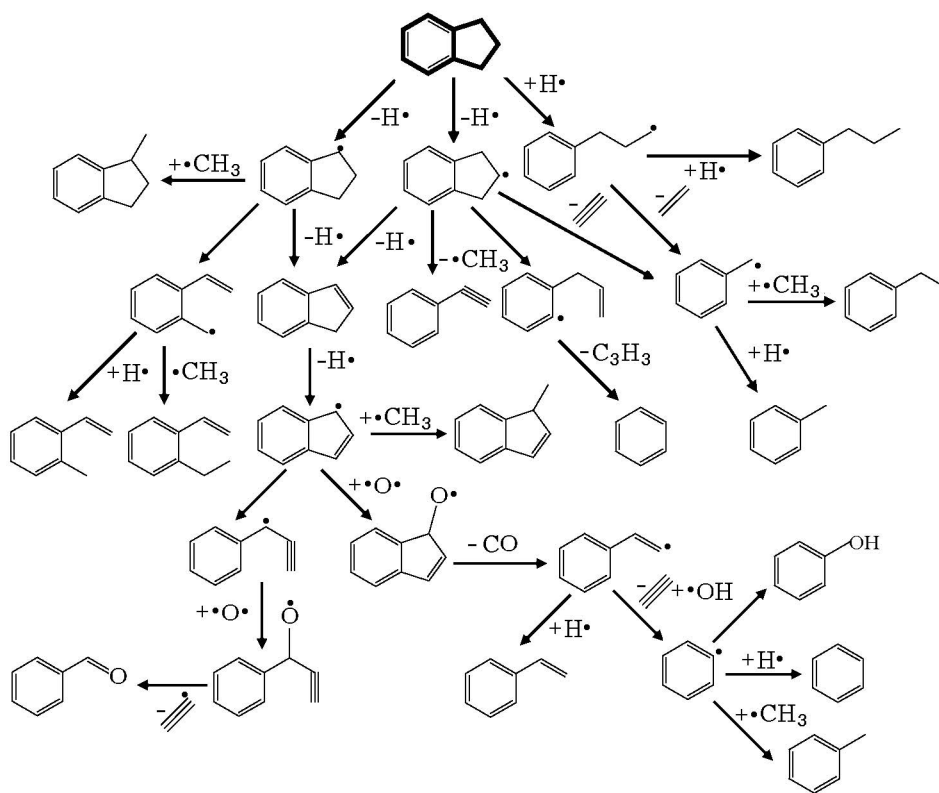


Рис. 13. Предполагаемые основные пути реакций при окислении индана в пламени

лобутан. Наиболее важными путями разложения индана, по всей видимости, является отрыв атома Н за счет реакции обмена или реакции с кислородом с образованием 1-инданила и 2-инданила. Образование 1-инданила должно быть более предпочтительным, поскольку у этой молекулы имеется два доступных места отщепления (две группы CH_2) и этот радикал также стабилизирован за счет резонанса. В молекуле 1-инданила β -разрыв связи $\text{C}-\text{C}$ с последующим присоединением атома водорода или метильного радикала CH_3 может привести к образованию соответственно α -метилстирола или α -этилстирола (эти соединения наблюдались экспериментально, но количественно не измерялись). Термическое разложение инданильных радикалов может также привести к образованию ацетилена и бензильного радикала. Присоединение к бензильному радикалу атома водорода приводит к образованию толуола, а его окисление дает бензальдегид. При рекомбинации бензильного и метильного радикалов образуется этилбензол. Инданильные радикалы также могут распадаться на бензол и пропаргильный радикал

(C_3H_3) или на фенилацетилен и CH_3 . Инден образуется в результате β -разрыва связи $\text{C}-\text{H}$ в 1-инданиле и 2-инданиле. При взаимодействии 1-инданила с метильным радикалом CH_3 образуется 1-метилиндан. При окислении индана образуется 1-инданон, а при отрыве атома Н от индана — инденил. Окисление последнего дает инденонил, который может перегруппироваться с отщеплением CO , и 2-фенилвинил, который, в свою очередь, разлагается с образованием бензола или при гидрогенизации дает стирол. Инденил может перегруппироваться и дать α -этилбензил, при окислении которого образуется бензальдегид.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе представлены новые экспериментальные результаты по структуре бедного ламинарного пламени предварительно перемешанной смеси метана и воздуха с добавкой индана, который рассматривается как один из важных компонентов дизельных топлив. Измерены профили температуры, а также получены профили концентраций 41 идентифицированного стабильного соединения от C_0 до C_{10} ,

включая 17 ароматических продуктов и 6 оксигенированных веществ, не считая реагентов.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Guibet J. C.** Fuels and engines. — Paris: Publications de l'Institut Français du Pétrole, Editions Technip, 1999.
2. **Battin-Leclerc F.** Detailed chemical kinetic models for the low-temperature combustion of hydrocarbons with application to gasoline and diesel fuel surrogates // Prog. Energy Combust. Sci. — 2008. — V. 63, N 4. — P. 440–498.
3. **Litzinger T. A., Brezinsky K., Glassman I.** The oxidation of ethylbenzene near 1060 K // Combust. Flame. — 1986. — V. 63. — P. 251–267.
4. **Litzinger T. A., Brezinsky K., Glassman I.** Reactions of *n*-propylbenzene during gas phase oxidation // Combust. Sci. Technol. — 1986. — V. 50. — P. 117–133.
5. **Litzinger T. A., Brezinsky K., Glassman I.** Gas-phase oxidation of isopropylbenzene at high temperature // J. Phys. Chem. — 1986. — V. 90. — P. 508–513.
6. **Dagaut P., Ristori A., El Bakali A., Cathonnet M.** Experimental and kinetic modeling study of the oxidation of *n*-propylbenzene // Fuel. — 2002. — V. 81. — P. 173–184.
7. **Roubaud A., Minetti R., Sochet L. R.** Oxidation and combustion of low alkylbenzenes at high pressure: comparative reactivity and auto-ignition // Combust. Flame. — 2000. — V. 121. — P. 535–541.
8. **Roubaud A., Lemaire O., Minetti R., Sochet L. R.** High pressure auto-ignition and oxidation mechanism of *o*-xylene, *o*-ethyltoluene, and *n*-butylbenzene between 600 and 900 K // Combust. Flame. — 2000. — V. 123. — P. 561–571.
9. **Dagaut P., Ristori A., Pengloan G., Cathonnet M.** Kinetic effect of dimethoxymethane on the oxidation of indane // Energy and Fuels. — 2001. — V. 15. — P. 372–376.
10. **Buda F., Bounaceur R., Warth V., Glaude P. A., Fournet R., Battin-Leclerc F.** Progress toward a unified detailed kinetic model for the autoignition of alkanes from C₄ to C₁₀ between 600 and 1200 K // Combust. Flame. — 2005. — V. 142. — P. 170–186.
11. **Da Costa I., Fournet R., Billaud F., Battin-Leclerc F.** Experimental and modelling study of the oxidation of benzene // Intern. J. Chem. Kin. — 2003. — V. 35. — P. 503–524.
12. **Bounaceur R., Da Costa I., Fournet R., Billaud F., Battin-Leclerc F.** Experimental and modeling study of the oxidation of toluene // Intern. J. Chem. Kin. — 2005. — V. 37. — P. 25–49.
13. **Gueniche H. A., Glaude P. A., Dayma G., Fournet R., Battin-Leclerc F.** Rich methane premixed laminar flames doped with light unsaturated hydrocarbons. Pt I: Allene and propyne // Combust. Flame. — 2006. — V. 146. — P. 620–634.
14. **Gueniche H. A., Glaude P. A., Fournet R., Battin-Leclerc F.** Rich methane premixed laminar flames doped by light unsaturated hydrocarbons. Pt II: 1,3-butadiene // Combust. Flame. — 2007. — V. 151. — P. 245–261.
15. **Gueniche H. A., Glaude P. A., Fournet R., Battin-Leclerc F.** Rich methane premixed laminar flames doped by light unsaturated hydrocarbons. Pt III: Cyclopentene // Combust. Flame. — 2008. — V. 152. — P. 245–261.
16. **Kent J. H.** A noncatalytic coating for platinum-rhodium thermocouples // Combust. Flame. — 1970. — V. 14. — P. 279–282.
17. **Bonne U., Grewer T., Wagner H. W.** Messungen in der Reaktionszone von Wasserstoff — Sauerstoff — und Methan — Sauerstoff — Flammen // Z. Phys. Chem. — 1960. — Bd 26. — S. 93–110.

Поступила в редакцию 11/XI 2008 г.,
в окончательном варианте — 21/IX 2009 г.