

Посвящается памяти учителя, профессора Г.И. Ксандопуло

ХИМИЯ ГАЗОФАЗНОГО ГОРЕНИЯ И САЖЕОБРАЗОВАНИЯ

З.А. Мансуров

Институт проблем горения, ул. Богенбай батыра, 172, Алматы, Казахстан

Аннотация

Данная статья посвящается памяти учителя, профессора, академика АТН Г.И. Ксандопуло. Ниже представлены обзор работ по изучению структуры фронта углеводородных пламен, выполнены под руководством Г.И. Ксандопуло, а также данные по исследованию образования фуллеренов и углеродных нанотрубок при горении углеводородов, полученные в Институте проблем горения в последнее время. В статье проведен обзор работ автора по изучению структуры фронта холодных пламен диэтилового эфира и бутана, предпламенной зоны нормальных пламен пропана и сажеобразованию при горении углеводородов. Рассмотрены феноменология, кинетика и механизм сажеобразования, влияние различных факторов на образование полициклических ароматических углеводородов (ПЦАУ), углеродных нанотрубок, фуллеренов, графенов и сажи.

- Низкотемпературная зона фронта углеводородных пламен
- Холодные пламена
- Неизотермические холодные пламена диэтилового эфира
- Обнаружение атомов водорода и их распределение во фронте стабилизированных холодных пламен углеводородов
- Синтез углеродных нанотрубок в режиме горения
- Сажеобразование при горении метана в электрическом поле
- Новые наноглеродные энергоемкие материалы

Ключевые слова: структура фронта пламени, атомы водорода, пероксидные радикалы, сажеобразование.

1. Введение

Говоря образно, по аналогии с Я.Б. Зельдовичем по случаю 75-летия Н.Н. Семенова, где он отметил: «Все мы вышли из цепной теории Н.Н. Семенова». Я думаю можно с полным правом сказать «Все мы вышли из низкотемпературной зоны пламени Г.И. Ксандопуло». Развитие Г.И. Ксандопуло в 70-х годах в Алматы работ по изучению химической структуры пламени [1, 2] явилось тем фундаментом, на котором выросли кафедра химической кинетики и горения КазГУ и Институт проблем горения.

Результаты научных трудов Георгия Ивановича Ксандопуло имеют исключительно

важное теоретическое и практическое значение. Разработанные им теоретические исследования позволили предложить ряд принципиально новых технологий с использованием процессов горения: разработана технология синтеза высокотемпературных сварочных составов серии «Фурнон» для огнеупоров и керамики; изготовлены керамические электронагреватели, получены химически стойкие покрытия на металле, СВС-катализаторы, пигменты для фарфора, декоративные глазури; разработан слоевой метод поэтапного восстановления металлов для синтеза многокомпонентных сплавов, разработано оборудование для технологической линии и создано производство благородных ферросплавов методом СВС под давлением.

В апреле 1988 г. профессор Г.И. Ксандопуло назначен директором Казахского межотраслевого научно-технического центра СВС, который в 1991 г. был преобразован в Институт проблем горения.

Результаты фундаментальных и прикладных исследований, проводимых Г.И. Ксандопуло совместно с сотрудниками Института проблем горения и кафедры химической физики и химии ВМС КазНУ, внесли существенный вклад в развитие целого ряда актуальных областей процессов горения. По этому поводу лауреат Нобелевской премии Н.Н. Семенов отметил: «Можно считать, что труды ученых кафедры и ИПГ заложили основы оригинальной Казахстанской школы в области химической физики».

Большой вклад профессора Г.И. Ксандопуло в развитие высшего образования и науки в Казахстане отмечен в 1992 г. званием лауреата Государственной премии Казахской ССР в области науки и техники за цикл работ «Фундаментальные исследования химических основ процессов горения».

Его труды получили признание во многих странах ближнего и дальнего зарубежья. Наиболее значимые результаты, полученные им в области научных исследований, часто цитируются в авторитетных научных журналах, диссертациях и монографиях.

2. Низкотемпературная зона фронта пламени пропана [3]

Исследования распределения атомов, радикалов и стабильных промежуточных веществ в предпламенной, низкотемпературной зоне фронта нормальных пламен и во фронте стабилизированных холодных пламен имеют важное значение для лучшего понимания механизма превращения топлива во фронте пламени. Фристромом и Вестенбергом [4] была показана возможность измерения локальных концентраций атомов и радикалов во фронте пламени методом ЭПР в сочетании с зондовой техникой. Перспективность метода стимулировала работы ряда исследователей [5-7], в которых при изучении разреженных пламен углеводородов с кислородом найдено, что во всех случаях атомарные водород и кислород обнаруживаются лишь в той части пламени, где превращение топлива уже завершено.

Изучено атмосферное, предварительно перемешанное близкое к стехиометрическому (4,2% пропана) пламя пропана с воздухом, ко-

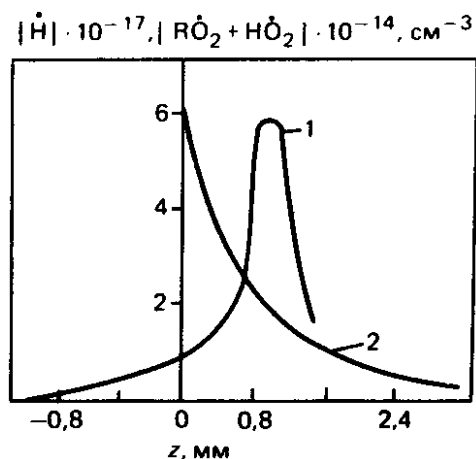


Рис. 1. Профили концентраций нестабильных веществ во фронте пламени пропана: 1 – пероксидные радикалы; 2 – атомы водорода.

торое создавалось на стеклянной конической горелке с внутренним диаметром отверстия 9 мм. Обнаружены атомы водорода и пероксидные радикалы и получены профили их концентраций во фронте пламени (рис. 1).

Максимальная концентрация атомов водорода зафиксирована вблизи светящейся зоны за фронтом пламени и достигает величины $1,7 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Далее, по мере удаления от внутренней границы светящейся зоны в более горячую область пламени, наблюдается экспоненциальное уменьшение концентрации атомного водорода, что, по-видимому, является результатом реакции рекомбинации Н-атома с атомами Н и радикалов ОН и HO_2 , характеризующимся высоким тепловыделением. С переходом внутренней границы светящейся зоны в сторону свежей смеси в наших опытах наблюдалось очень резкое падение концентрации атомов Н, так уже в точках $-0,1-0,2$ мм сигнал ЭПР атомов Н был ниже уровня шумов прибора.

Наличие перекисных радикалов в холодной зоне фронта пламени свидетельствует о протекании в предпламенной зоне интенсивной реакции, особенностью которой является то, что она обнаруживается в области, где возрастание температуры исходной газовой смеси составляет $10-50^\circ$.

Форма спектров ЭПР пероксидных радикалов, вымороженных из холодной зоны фронта пламени, соответствует форме суммарного спектра радикалов HO_2 и RO_2 . В спектрах же радикалов, вымороженных их горячей зоны (начиная с точки $Z = 0,1$ мм), обнаруживается появление еще одной хорошо разрешенной линии, что свидетельствует о вымораживании, по крайней мере, суммы трех типов радикалов.

3. Неизотермические холодные пламена диэтилового эфира [8]

При изучении стабилизированных на плоской горелке двухстадийных (12,5 и 18,0% эфира) и одностадийных (32% эфира) холодных пламен диэтилового эфира с воздухом получены профили температуры пероксидных материалов.

Разработан метод стабилизации холодного пламени на заданном расстоянии от матрицы горелки, что позволило изучить влияние разогретой поверхности матрицы. Сравнение спектров ЭПР проб, отобранных из светящейся зоны, расположенных на различных расстояниях от матрицы, свидетельствует, что в случае, когда фронт пламени ближе к матрице, в спектре ЭПР наблюдается расщепление линии, характерное для HO_2 радикалов и указывает на наложение двух видов радикалов.

На рис. 2 представлены профили температуры и концентрации пероксидных радикалов во фронте двухстадийного пламени диэтилового эфира (18 % эфира), из которого видно, что максимум концентрации находится во фронте холодного пламени и составляет $30,0 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$, что в шесть раз больше, чем во фронте голубого пламени. Такое распределение концентрации радикалов, по-видимому, связано с тем, что за фронтом холодного пламени образуются радикалы с небольшим молекулярным весом, температура заморозки которых ниже температуры жидкого азота.

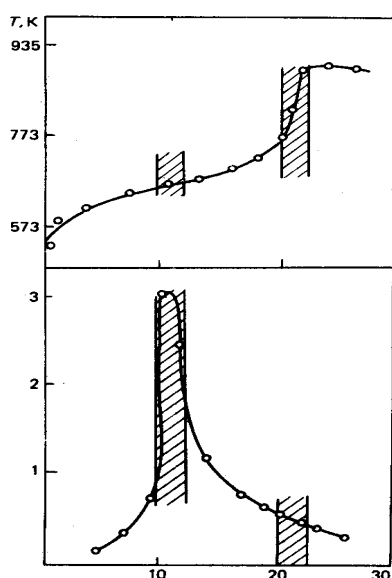


Рис. 2. Профиль температуры и концентрации пероксидных радикалов: а – для двухстадийного пламени эфира (18%); б – для холодного пламени (32%) (заштрихованы области свечения пламени).

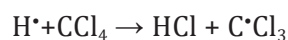
В одностадийном богатом эфиром (32,0%) пламени максимальная концентрация пероксидных радикалов равна $8,1 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$.

4. Обнаружение атомов водорода и их распределение во фронте стабилизированных холодных пламен углеводородов [9]

Обнаружение методом ЭПР атомов водорода и оценка концентрации в низкотемпературной зоне затруднено, во-первых, из-за их низкой концентрации и, во-вторых, высокой реакционной способности, что в сочетании с незавершенностью окисления в этой зоне приводит к взаимодействию радикалов в канале пробоотборника с молекулярным кислородом, исходным топливом и реакциям рекомбинации радикалов.

Для обнаружения атомов водорода в стабилизированных холодных пламенах, по-видимому, целесообразно использование известного метода захвата радикала [7, 10] с переводом атома водорода в конечный продукт.

В качестве добавки использован четыреххлористый углерод, который по реакции



Осуществляет захват H-атомов с образованием HCl. Для определения концентрации последнего использован метод амперометрического титрования [11], разработанный чл.-кор. АН КазССР Сонгиной О.А.

Для получения плоского, одномерного фронта пламени использован двухсекционный реактор, секции которого разделены перфорированной пластиной из пирекса. Перфорированная пластина представляет собой диск с 50 отверстиями по всей площади, суммарная площадь отверстий – 50 мм^2 . Реактор представляет собой пирексовый цилиндр с внутренним диаметром 62 мм, длина первой секции – 300 мм, второй – 100 мм, установлен в вертикальном положении и горючая смесь подается снизу в первую секцию.

Для определения атомов H использована методика, сочетающая метод захвата радикалов [9, 12] с подачей добавки вблизи точки отбора пробы. В качестве добавки применяли четыреххлористый углерод, использованный для захвата H атомов с последующим определением концентрации ионов хлора амперометрическим титрованием. Диаметры отверстия зонда и капилляра одинаковы и равны 70 мкм.

Замораживание проводили жидким азотом. На основании оптимизации условий эксперимента подачу CCl_4 проводили при температуре печи 520 К и постоянном перемешивании; время отбора пробы – 1 час, объем отобранной пробы составляет 0,2-0,3 мл.

В полученной пробе после размораживания, используя метод амперометрического титрования, определяли концентрацию ионов хлора, которая равна количеству Н-атомов.

$$C_{\text{H}} = [C_{\text{Cl}} / (\text{Э}_{\text{Cl}} A (\text{H}) 100)] 6,023 \cdot 10^{23}$$

Затем находили концентрацию атомов водорода за 1 сек, в точке отбора по формуле:

$$[\text{H}] = \text{CH} / Q \cdot t,$$

где: $[\text{H}]$ – концентрация Н-атомов част/см³; Q – пропускная способность зонда, см³/с; t – время отбора пробы, с.

Эксперименты по обнаружению атомов водорода проведены с холодными стабилизированными пламенами бутана и гексана. Опыты проведены при атмосферном давлении при соотношении $\text{C}_4\text{H}_{10}:\text{O}_2 = 1:2$, $T_1 = 443$ К, $T_2 = 733$ К. Диаметр исходного отверстия кварцевого зонда $d = 70$ мкм.

На рис. 3 приведены профили концентрации атомов водорода и температуры во фронте стабилизированного холодного пламени бутана. Как видно, максимальная концентрация атомов водорода равна $1,6 \cdot 10^{11}$ см⁻³, которая по времени несколько опережает температурный максимум. Следует отметить, что минимальная концентрация атомов водорода в пламени бутана равна $3,0 \cdot 10^{10}$ см⁻³ при температуре 593 К, т.е. в 5 раз меньше максималь-

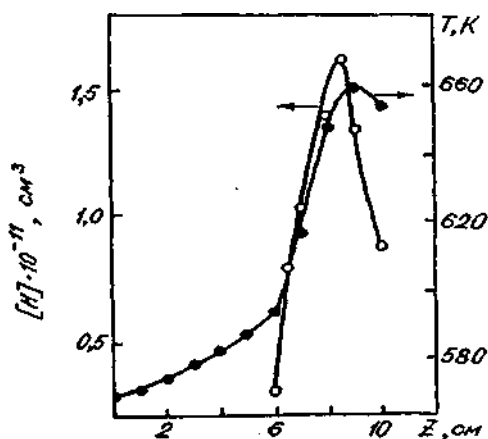


Рис. 3. Профили температуры и концентрации атомов водорода $T_1 = 443$ К, $T_2 = 730$ К, $\text{C}_4\text{H}_{10}:\text{O}_2 = 1:2$

ной концентрации. Полученный результат аналогичен данным по профилям концентрации пероксидных радикалов при зондировании холодного пламени диэтилового эфира [8], описанного в предыдущем разделе, а также данным Манташьяна с сотр. [13] при изучении холоднотемпературного окисления пропана.

Попытаемся теперь оценить роль атомов водорода при холоднотемпературном окислении углеводородов. Для сравнения нам необходимо рассчитать константы скорости взаимодействия углерода с указанными радикалами при $T = 600$ К, соответствующими нашим экспериментальным данным.



Кинетические данные указанных реакций взяты из обзора Линьолы и Реверчона [14] для режима холодных пламен (500-800 К). Подставим теперь значения констант скорости и величины концентрации атомов водорода и RO_2 . Величина концентраций RO_2 взята из работы по зондированию холодного пламени диэтилового эфира [8] в точке, где температура равна 600 К и получено следующее выражение:

$$\frac{W_1}{W_2} = \frac{K_1[\text{H}]}{K_2[\text{RO}_2]} = \frac{3,1 \cdot 10^{14} e^{-\frac{35600}{R-600}} \cdot 1,4 \cdot 10^{11}}{3,2 \cdot 10^{11} e^{-\frac{68900}{R-600}} \cdot 2,2 \cdot 10^{14}} = 4,8 \cdot 10^2$$

Таким образом, видно, что, несмотря на то, что концентрация атомов водорода в 100 раз меньше концентрации пероксидных радикалов, реакции превращения топлива с участием атомов протекают в 480 раз быстрее. На основании приведенной оценки скорости взаимодействия атомов водорода и пероксидных радикалов с углеводородами можно сделать вывод о существенной роли атомов водорода в реакциях холоднотемпературного окисления. Можно полагать, что существенная роль атомов водорода заключается в быстром переводе молекул топлива в алкильные радикалы.

5. Синтез углеродных нанотрубок в режиме горения [15, 16]

Наиболее перспективным способом производства углеродных нанотрубок, является пламенный метод. В случае использования пламени для синтеза углеродных наночастиц часть топлива расходуется на разогрев смеси, а часть используется как реагент, что является более экономичным по сравнению с методами,

основанными на использовании электричества, такими как пиролиз углеводородов или дуговое испарение графита.

В эксперименте использовалась методика подачи катализатора с помощью ультразвукового распылителя благодаря чему катализатор направлялся в реакционную зону в виде аэрозоля со стороны топлива.

Эксперимент по получению углеродных нанотрубок в пламени на встречных струях проводился на установке, схема которой представлена на рис. 4.

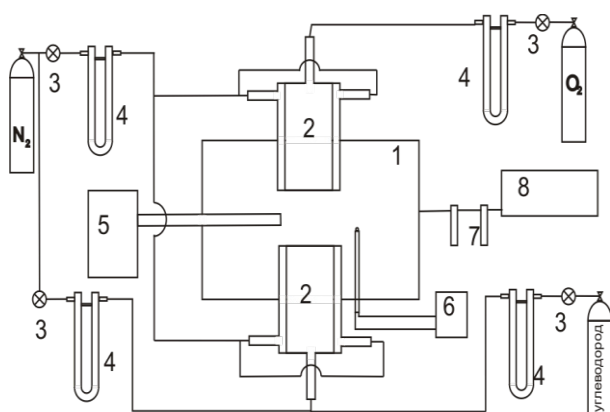


Рис. 4. Схема работы экспериментальной установки: 1 – реактор; 2 – горелки; 3 – игольчатые краны; 4 – реометры; 5 – ультразвуковой распылитель; 6 – цифровой вольтметр; 7 – ловушки с жидким азотом; 8 – вытяжка.

В качестве топлива использовался пропан, а окислителя – кислород. Два встречных потока образовывали плоское пламя. Пламя окружал поток азота, исходящий из рубашки горелок. Раствор катализатора распылялся ультразвуковым распылителем и подавался через металлическое сопло в пламя со стороны топлива. В качестве катализатора использовался $\text{Fe}(\text{CO})_5$ или спиртовой раствор нитрата никеля. Условия эксперимента представлены в таблице 1.

Полученные продукты осаждались на стенках реактора. Температура в реакторе измерялась термопарой, а в пламени – пирометром *Iron Ultrimax*.

Таблица 1. Условия эксперимента

Тип катализатора	$\text{Fe}(\text{CO})_5$				$\text{Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	
Расход катализатора, м ³ /мин	0,3				0,3	
Расход газа, см ³ /мин	C_2H_2	O_2	N_2	C_3H_8	O_2	N_2
	130-210	100-170	50-200	70-160	160-210	50-200
Температура пламени, °С	1700-1850				900-1150	

Как видно из рис. 5, образцы содержат сажевые агломераты, среди которых наблюдаются металлические частицы. Было обнаружено, что при определенных условиях эксперимента возможно образование хорошо упорядоченных жгутов углеродных нанотрубок.

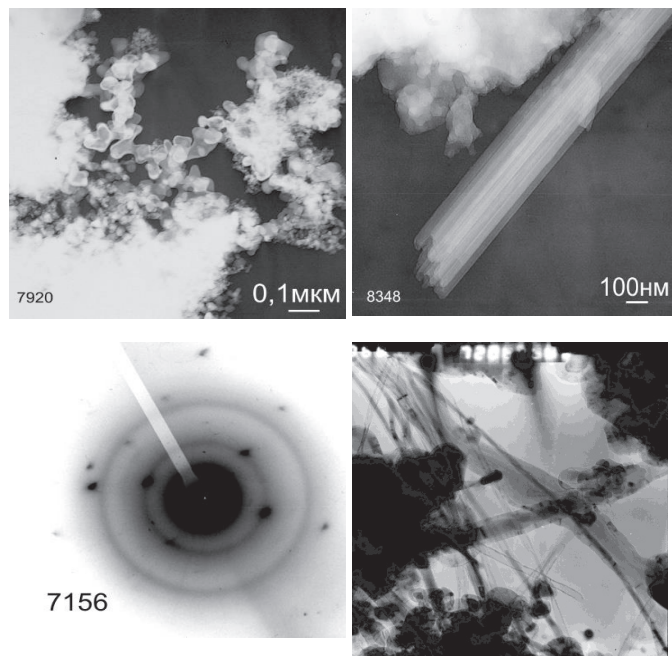


Рис. 5. Электронно-микроскопические снимки образцов.

6. Сажеобразование при горении метана в электрическом поле

Изучено горение сажеобразующего метана в электрическом поле в проточном кварцевом реакторе [17]. Цель работы – оптимизация условий горения путем выбора формы электродов и расстояния между ними, а также изучение влияния величины приложенного потенциала и его полярности на выход и размеры сажевых частиц.

В работе использована методика стабилизации пламени в двухсекционном отдельно обогреваемом реакторе [18, 19]. В первой секции смесь метана с кислородом подогревали, а во второй – воспламеняли и стабилизировали

пламя. Последнее было изолировано от предпламенной зоны благодаря тому, что скорость потока в узкой перемычке, соединяющей первую и вторую секции, во много раз больше скорости пламени, стабилизированного во второй секции.

В первой серии экспериментов на верхний электрод подавали как положительное, так и отрицательное относительно нижнего электрода напряжение, величину которого изменяли от 0 до 2,2 кВ. Во второй серии экспериментов на верхний электрод подавали отрицательное (относительно нижнего электрода) напряжение, величину которого изменяли от 0 до 0,5 кВ.

Эксперименты проведены при температурах первой (T_1) и второй (T_2) секций реактора, равных 773 и 1173 К соответственно. Расход топлива Q_{CH_4} и окислителя Q_{O_2} составлял 2000 и 1075 см³/мин, соответственно. Горючую смесь предварительно перемешивали. Сажу, полученную в каждом эксперименте, взвешивали и исследовали на электронном микроскопе и дифрактометре ДРОН-0,5 (Си К α -излучение).

На рис. 6а показана зависимость выхода сажи от величины приложенного потенциала для первой (кривые 1 и 2) и второй (кривая 3) серии экспериментов. При наложении на верхний электрод положительного (относительно нижнего) потенциала (рис. 6а, кривая 2) происходит уменьшение выхода сажи с 11,2% (без напряжения) до 3% (при 2,2 кВ). Еще сильнее уменьшается выход сажи в случае, когда верхний электрод относительно нижнего заряжен положительно (рис. 6а, кривая 1).

Во второй серии экспериментов (рис. 6а, кривая 3) наблюдали снижение вдвое выхода

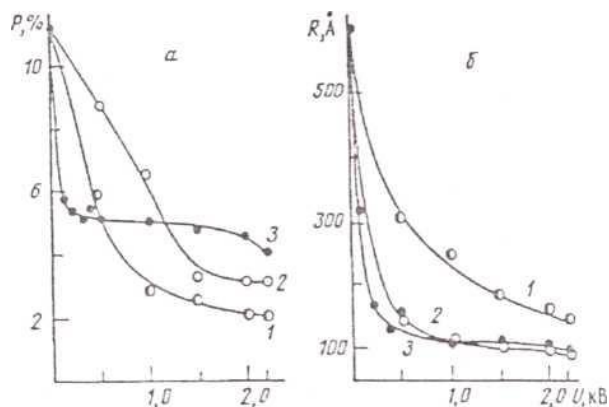
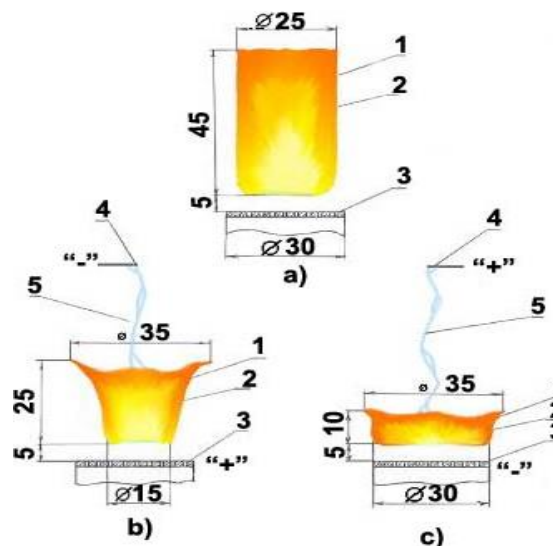


Рис. 6. Зависимость выхода сажи P (а) и размера ее частиц (б) от величины приложенного потенциала при полярности на электродах: 1 – Т; 2 – и; 3 – Т (для 1 и 2 расстояние между электродами – 90 мм, для 3 – 205 мм).

сажи уже при 0,1 кВ аналогичным показателем, полученным без наложения поля. Дальнейшее увеличение потенциала приводит к незначительному уменьшению выхода сажи.

По данным электронной микроскопии, радиус частиц сажи, полученной при горении метана в электрическом поле различной напряженности, также зависит от величины приложенного потенциала (рис. 6б). Следует отметить, что при повышении напряженности поля разброс частиц по размерам уменьшается, образуется более однородная сажа.

На рис. 7 показаны фотографии фронта пламени при наложении и без наложения электрического поля. Как видно, происходит уменьшение высоты, она меняется в связи с тем, что происходит ускорение всех процессов за счет электрического поля. Фронт не успевает вырасти до больших размеров.



а – без наложения электрического поля; б – при суперпозиции электрического поля отрицательной полярности, $U=10$ кВ; в – при наложении электрического поля положительной полярности, $U=10$ кВ. 1 – фронт пламени; 2 – центральная светящаяся часть; 3 – матрица горелки; 4 – верхний электрод-игла; 5 – светящийся шнур тлеющего разряда.

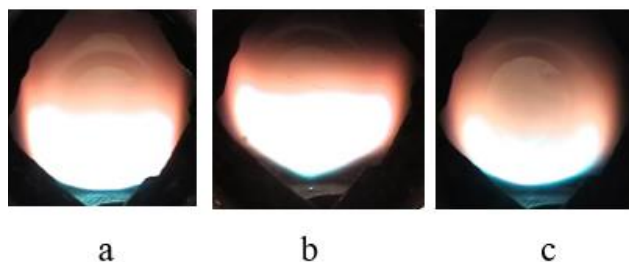


Рис. 7. Высота пламени при отрицательной полярности уменьшалась на 45%, а при положительной полярности на 80%.

В 1990 г. я защитил докторскую диссертацию в Институте структурной макрокинетики АН ССР на тему «Неизотермические холодные пламена углеводорода», и перед защитой 15 марта я приехал во ВНИИ ТУ (г. Омск) с кандидатом химических наук В.Т. Поповым (Институт нефтехимического синтеза, г. Москва). Нас принял директор института, д.т.н., лауреат Ленинской премии Виталий Федорович Суrowикин и дал добро на проведение испытаний предложенного мной метода наложения электрического поля для повышения удельной поверхности сажи.

Совместно с сотрудниками ВНИИ ТУ провели эксперименты по получению сажи при наложении электрического поля. На основании чего был получен акт внедрения о том, что полученная сажа имеет удельную геометрическую поверхность на 30% больше, чем у сажи, полученной без воздействия поля. Акт подписан заместителем директора С.В. Ореховым. Данное внедрение и в настоящее время является актуальным.

7. Новые наноуглеродные энергоемкие материалы

Методом дифференциального термического анализа исследовано влияние активированных углей с многослойными графенами (три и более слоев) на термическое разложение состава на основе нитрата гидроксиламмония и карбоксилметилцеллюлозы. Показано, что добавка активированного угля с многослойными графенами приводит к увеличению до четырех раз скорости горения нитрата гидроксиламмония. Установлено снижение температуры и времени химической реакции до полного разложения нитрата аммония при добавке активированных углей в процессе термического разложения.

На сегодняшний день углеродсодержащие наноматериалы являются одними из наиболее популярных материалов для научных исследований. В одной из первых работ [20] по применению в топливах углеродсодержащих материалов, в частности углеродных нанотрубок, было достигнуто заметное увеличение скорости горения высокоэнергетичных топлив при включении в их состав от 1 до 15 % углеродных нанотрубок. В более поздней работе [21] установлено, что применение углеродных нанотрубок в смеси с углеводородными топливами приводит к повышению КПД топлив в двигателях внутреннего сгорания.

В качестве технологической добавки в ракетные топлива, наряду с углеродными нанотрубками, были исследованы частицы оксидов графена и графита [22]. Работы по применению частиц графена в составе различных топлив являются относительно новыми [23-27]. Результаты исследований по добавлению многослойных графенов для улучшения характеристик горения топлив представлены в работе [28], где для повышения скорости горения нитрометана наноразмерные частицы алюминия и оксида кремния были заменены дисперсными частицами графена. Установлено, что частицы многослойного графена проявляют каталитическую активность при разложении нитрометана и непосредственно принимают участие в реакции горения, повышая температуру и скорость реакции топлива, т.е. являются промоторами.

Широко известна практика применения активированных углей в качестве технологической добавки в композиции металлизированных и неметаллизированных топлив [29]. В работе [30] отмечалось, что активированный уголь, введенный в состав алюминизированных твердых топлив, является эффективным модификатором скорости горения. В работе [31] показана перспективность активированного угля для использования в качестве потенциального модификатора скорости горения для большинства неметаллизированных твердых топлив. Было установлено, что добавление небольшого количества (0,4 %) древесного угля существенно повышает скорость горения алюминизированных смесевых топлив. Активированный уголь вместе с переходными металлами и их оксидами (Fe_2O_3 , CuO) проявляет синергетический эффект и увеличивает скорость горения примерно в пять раз, до $r_b = 54$ мм/с при давлении $p_0 = 7$ МПа по сравнению с базовым составом ($r_b = 11$ мм/с при $p_0 = 7$ МПа).

В последнее время в качестве технологических добавок к топливу привлекают внимание металлоорганические структуры, отличающиеся высокопористой кристаллической структурой, высокой удельной поверхностью (до 4000 $\text{m}^2/\text{г}$) и возможностью управления физико-химическими свойствами путем внедрения металлических центров. По существу, металлоорганические структуры являются прекурсорами для изготовления наноструктурированных углеродных каркасов с металлическими частицами внутри [32, 33]. Однако способ изготовления этих объемных полимеров является дорогостоящим и многоступенчатым процессом.

В связи с этим представляет интерес поиск альтернативных методов получения технологических добавок с высокоразвитой поверхностью, в частности многослойных графенов [34-36]. Целью настоящей работы является разработка метода синтеза многослойных графенов из растительного сырья и использование их в качестве энергетических добавок для промотирования термического разложения и горения нитрата гидроксиламмония и нитрата аммония.

В настоящей работе активированный уголь, полученный из РШ, исследовался по методике, совмещающей в себе два способа оценки микро- и наноструктурированных объектов: сканирующую электронную микроскопию (СЭМ) и рамановскую спектроскопию, что позволяет оценить топологию сформированной углеродной структуры, количество слоев, имеющих в составе частиц графена, присутствие химических примесей и дефектность структуры. На СЭМ-фотографии угля на рис. 8 видны частицы с характерной для графена структурой, имеющие скомканную полупрозрачную поверхность. Слои содержат дефекты и включения твердых углеродных компонентов, однако встречаются участки без дефектов с однородной структурой поверхности. Элементный состав активированного угля указывает на эффективное удаление (посредством химической активации и промывки) кремниевых примесей, что говорит об исключительно высокой концентрации углеродной составля-

ющей. Можно заключить, что полученный активированный уголь имеет характерную морфологию поверхности, заданную исходным сырьем (РШ), и обладает развитой удельной поверхностью ($3000 \text{ м}^2/\text{г}$) с большим количеством микро- и мезопор.

Известно, что рамановская спектроскопия является одним из информативных методов для исследования углеродных структур с высокой степенью графитизации [37-40]. В данной работе такое исследование проводилось с длиной волны 473 нм в 6-7 точках образца. Как видно из спектров на рис. 9, полученный углеродный материал состоит из анизотропных неупорядоченных углеродных структур и значительного количества многослойных графеновых структур. Интенсивность пиков G и 2D позволяет заключить, что графеновая пленка состоит из трех или более слоев ($I_{2D}/I_G = 0,63$). На всех спектрах присутствуют пики D, G и 2D, что свидетельствует о наличии деформаций в кристаллической структуре графеновой пленки, а также о наличии механических напряжений. Детальное изучение результатов спектроскопии комбинационного рассеяния показало, что полученный образец из рисовой шелухи состоит из многослойного графена с содержанием аморфных компонентов угля.

Активированный уголь и многослойные графены имеют на поверхности множество реакционноспособных центров в виде пор и дефектов, свободных атомов на углах и гранях, а также характеризуются большой удельной

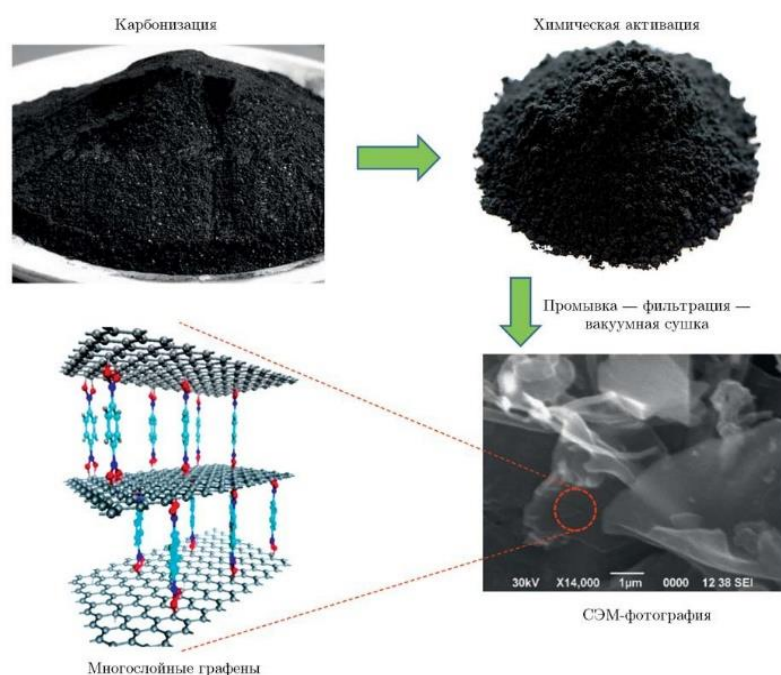


Рис. 8. Схема процесса получения активированных углей с графеновыми слоями.

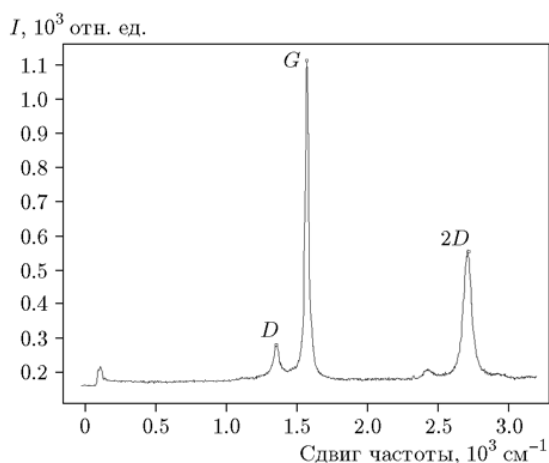


Рис. 9. Рамановские спектры активированного угля, полученного из рисовой шелухи.

поверхностью. Считается, что на структурных неоднородностях, дефектах и порах углерода образуются активные центры, которые промотируют химические процессы. Можно предположить, что при разложении НГА в присутствии активированных углей именно в этих центрах происходит аккумуляция тепла, что, в свою очередь, поднимает температуру всей системы. Вышеперечисленные факторы, несомненно, играют роль в увеличении скорости окисления и скорости горения топлива [28]. Схема горения НГА с добавкой активированного угля в жидкой фазе при $p_0 = 6$ МПа представлена на рис. 10.

Процесс характеризуется как конвективное горение, присущее горению большинства однокомпонентных жидких топлив. В присутствии активированного угля горение протекает более бурно, образуется турбулентное пламя, а также выделяется большой объем газов.

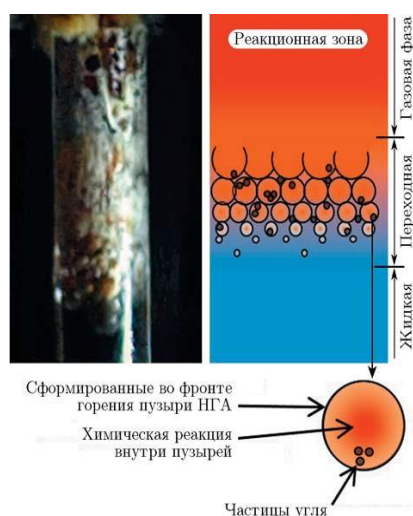


Рис. 10. Распространение волны горения при сжигании НГА в жидкой фазе при $p_0 = 6$ МПа.

На рис. 10 представлено распространение волны горения при сжигании НГА в жидкой фазе при $p_0 = 6$ МПа в трех зонах (жидкость–смешанная зона, пузыри и газ–газ). Предполагается, что при этом частицы активированного угля находятся преимущественно внутри пузырей топлива, которые формируются при нагреве НГА, где и накапливается большое количество тепла за счет химической реакции разложения топлива [41].

8. Полная схема образования сажи, фуллеренов и графена в пламени с богатым топливом [42]

Для построения полной схемы для богатых топливных пламен следует отметить работу Ягера и Старика. Ягер отметил, что нано- и субнаноразмерные частицы образуются путем газофазной конденсации в асимптотических гигантских разветвленных звездах. Эксперименты проводились при давлениях 0,1-2,6 и 7 мбар, близких к значениям p в астрофизической атмосфере при температурах $T < 1700$ К, при которых наблюдалось образование фуллеренов.

На основе новых данных по синтезу фуллеренов, углеродных нанотрубок, супергидрофобной сажи и графена в пламени появилась возможность модифицировать общую схему, предложенную Х. Бокхорном и Френкляхом для пламени богатого топлива. Мы ввели координату давления, которая позволяет объяснить образование фуллеренов при низких давлениях, и с увеличением тройных столкновений образование сажи при высоких давлениях. Дополнительно схема была дополнена образованием графена как промежуточного продукта стадии образования графена. В данной схеме описано образование сажи для различных (любых) видов топлива.

Механизм образования сажи очень сложный, включающий многие тысячи видов и реакций. Очень быстрые реакции, например, время превращения метана - 16 а.е.м. в частицу сажи диаметром 50 нм, состоящую из 1 млн. атомов углерода, составляет 10^{-3} секунды, происходят чрезвычайно быстрые реакции полимеризации.

Я разработал такой механизм, при таких условиях можно получить фуллерены, графены и т.д. Фуллерены могут получаться при низких давлениях, в механизме Vochozn этого нет. Я ввел координату давление, при низких давлениях образуется фуллерены для того чтобы

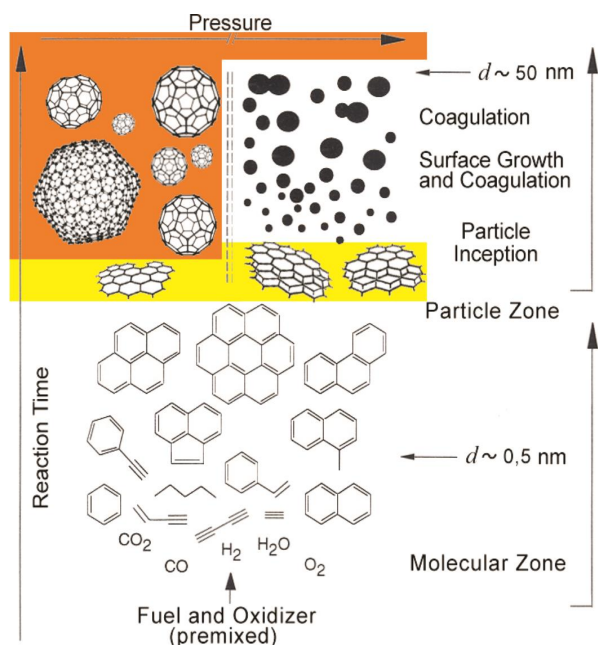


Рис. 11. Полная схема образования сажи, фуллеренов и образования графена в пламени.

фуллерен образовался нужен зип механизм – это стерический фактор. Графены, однослойные при низких, а многослойные графены образуются при высоких давлениях.

9. Заключение

Структура пламени – основа исследования процессов горения это глубокое понимание роли активных частиц, диффузии в процессах горения. В последние годы пламя привлекает ученых как среда для синтеза фуллеренов и УНТ.

Много лет назад Г.И. Ксандопуло поставил крупную задачу исследования структуры пламени и развития технологического горения и в настоящее время мы наблюдаем успехи Института проблем горения в реализации данной задачи.

Литература

- [1]. Ксандопуло Г.И. Химия пламени. – Москва: Химия, 1980. – 256 с.
- [2]. Ксандопуло Г.И., Дубинин В.В. Химия газофазного горения. – Москва: Химия, 1988. – 320 с.
- [3]. Ксандопуло Г.И., Сагиндыков А.А., Мансуров З.А. Низкотемпературная зона фронта пламени углеводородных пламен V. Профили концентрации атомарного водорода и перекисных радикалов во фронте пропан-воздушного пламени // Физика горения и

взрыва. – 1975. – Т.11, №6. – С.838-843.

- [4]. Westenberg A.A., Fristrom R.M. H- and O-Atom Profiles Measured by ESR in C₂ Hydrocarbon-O₂ Flames // 10th Symp. Int. on Combustion. Pittsburgh, Pennsylvania, 1965. – P.373.
- [5]. Vos H.J., Wisman W.H., Schmidt j. Investigation in Flames // J.Magn. Res. and Related Phenom. Proc. 16th Congress AMPERE, Bucharest, 1971.
- [6]. Friswell N.J., Sutton M.M. Radical Recombination Reactions in the H₂/O₂/N₂ Flames: Participation of the HO₂ Radical // Chem.Phys.Lett. – 1972. – Vol.15. – P.108.
- [7]. Fristrom R.M. Scavenger Probe Sampling: a method for Studying Gaseous Free Radicals // Science. – 1963. – Vol.140, №3564. – P.297.
- [8]. Мансуров З.А., Мироненко А.В., Жукова Л.Н., Ксандопуло Г.И. Обнаружение радикалов и их распределение во фронте неизотермического холодного пламени диэтилового эфира // ДАН СССР. – 1978. – Т.239. – С.883-885.
- [9]. Мансуров З.А. Обнаружение атомов водорода и их распределение во фронте стабилизированных холодных пламен углеводородов // Международная конференция по аналитической химии, 2001. – С.87-90.
- [10]. Kubitzka Ch., Schotter M., Homana K.I. Scavenging of Radicals from Gas Phase by Freezing with Dimethyl Disulfide. Radicals from Discharges and a Flame of Acetylene // Ber. Bunsenges Phys. Chem. – 1987. – Vol.91. – P.695-700.
- [11]. Сонгина О.А., Захаров В.А. Амперометрическое титрование. М.: Мир, 1970. – 304 с.
- [12]. Мансуров З.А. Неизотермические холодные пламена углеводородов. Автореф. Дисс. Докт. хим. наук. Черноголовка 1990. – 48 с.
- [13]. Гукасян П.С., Манташян А.А., Саядян Р.А. Обнаружение высоких концентраций радикалов в зоне холодного пламени в реакции окисления пропана // Физика горения и взрыва. – 1976. – Т.12, №5. – С.789.
- [14]. Lignola P.O., Reverchon E. Cool Flames // Progress in Energy and Combustion Science – 1987. – Vol.13. – P.75-96.
- [15]. Mansurov Z.A. Formation of fullerenes and carbon nanotubes in hydrocarbon flames // Abstracts of the International Conference Carbon, Biarritz, France, 2009. – P.70.
- [16]. Ченчик Д.И., Мансуров З.А., Шабанова Т.А., Орыншаих Т. Получение углеродных нанотрубок в горелке на встречных струях // Материалы IV международного симпозиума «Горение и плазмохимия». Алматы, 2007. – С.288-290.
- [17]. Мансуров З.А., Меркулов А.А., Попов В.Т., Тулеутаев Б.К., Алмазов Н.С. Образование ультрадисперсной сажи при горении метана в электрическом поле // Химия твердого топлива. – 1994. – №3. – С.83-86.
- [18]. Мансуров З.А., Тулеутаев В.К., Пестерев В.И.

- Использование полиароматических углеводородов – продуктов низкотемпературного горения метана // Нефтехимия. – 1989. – Т.29, №2. – С.188-191.
- [19]. Мансуров З.А., Тулеутаев Б.К., Попов В.Т. Сажеобразование при низкотемпературном горении метана // Физика горения и взрыва. – 1991. – Т.27, №1. – С.42-45.
- [20]. Lijima S. Helical microtubules of graphitic carbon // Nature. – 1991. – Vol.354. – P.56-58.
- [21]. Basha J.S., Anand R.B. An experimental investigation in a diesel engine using carbon nanotubes blended water – diesel emulsion fuel // J. Power Energy. – 2011. – Vol.225, №3. – P.279-288.
- [22]. Chehroudi B. Applications of graphene in fuel // Propellant Combustion: Graphene Science Handbook. – CRC Press, 2016. – P.391-398.
- [23]. Fowler J.D., Allen M.J., Tung V.C., Yang Y., Kaner R.B., Weiller B.H. Practical chemical sensors from chemically derived graphene // ACS Nano. – 2009. – Vol.3, №2. – P.301-306.
- [24]. Schniepp H.C., Li J.-L., McAllister M.J., Sai H., Herrera-Alonso M., Adamson D.H., Aksay I.A. Functionalized single graphene sheets derived from splitting graphite oxide // J. Phys. Chem. B. – 2006. – Vol.110, №17. – P.8535-8539.
- [25]. McAllister M.J., Li J.-L., Adamson D.H., Schniepp H.C., Abdala A.A., Liu J., Aksay I.A. Single sheet functionalized graphene by oxidation and thermal expansion of graphite // Chem. Mater. – 2007. – Vol.19, №18. – P.4396-4404.
- [26]. Ramanathan T., Abdala A.A., Stankovich S., Dikin D.A., Herrera Alonso M., Piner R.D., Brinson L.C. Functionalized graphene sheets for polymer nanocomposites // Nature Nanotechnol. – 2008. – Vol.3, №6. – P.327-331.
- [27]. Chehroudi B. Nanotechnology and applied combustion: Use of nanostructured materials for light-activated distributed ignition of fuels with propulsion applications // Recent Patents on Space Technology. – 2011. – Vol.1. – P.107-22.
- [28]. Sabourin J.L., Dabbs D.M., Yetter R.A., Dryer F.L., Aksay I.A. Functionalized graphene sheet colloids for enhanced fuel/propellant combustion // ACS Nano. – 2009. – Vol.3, №12. – P.3945-3954.
- [29]. Ishitha K., Ramakrishna P.A. Activated charcoal: as burn rate modifier and its mechanism of action in non-metalized composite solid propellants // Int. J. Adv. Eng. Sci. Appl. Math. – 2014. – Vol.6, №1-2. – P.76-92.
- [30]. Verma S., Ramakrishna P. A. Investigations on activated charcoal, a burn-rate enhancer in composite solid propellant // J. Propul. Power. – 2013. – Vol.29, №5. – P.1214-1219.
- [31]. Verma S., Ramakrishna P.A. Activated charcoal – A novel burn rate enhancer of aluminized composite propellants // Combust. Flame. – 2010. – Vol.157, №6. – P.1202-1210.
- [32]. Di Capua R., Gargiulo V., Alfe M. Graphenelike layers from unconventional carbon sources: New perspectives on hybrid materials and π system synergisms // Eurasian Chem.-Technol. J. – 2016. – Vol.18, №4. – P.263-274.
- [33]. Seo J.S., Whang D., Lee H., Jun S.I., Oh J., Jeon Y.J., Kim K. A homochiral metal-organic porous material for enantioselective separation and catalysis // Nature. – 2000. – Vol.404, №1. – P.982-986.
- [34]. Srinivas G., Burrell J.W., Ford J., Yildirim T. Porous graphene oxide frameworks: Synthesis and gas sorption properties // J. Mater. Chem. – 2011. – Vol.30, №30. – P.11323.
- [35]. Burrell J.W., Gadipelli S., Ford J., Simmons J.M., Zhou W., Yildirim T. Graphene oxide framework materials: Theoretical predictions and experimental results // Angew. Chemie. – 2010. – Vol.122, №47. – P.9086-9088.
- [36]. Рожков А. В. Графен 2.0 // Химия и жизнь – XXI век. – 2017. – №10. – С.2-7.
- [37]. Seitzhanova M.A., Kerimkulova M.R., Shyntoreev E.B., Azat S., Kerimkulova A.R., Mansurov Z.A. Development of the method for obtaining carbon ceramic adsorbents based on porous carbon // Chem. Bull. Kazakh Nat. Univ. – 2015. – №2. – P.37-41.
- [38]. Jandosov J.M., Shikina N.V., Bijsenbayev M.A., Shamalov M.E., Ismagilov Z.R., Mansurov Z.A. Evaluation of synthetic conditions for H_3PO_4 chemically activated rice husk and preparation of honeycomb monoliths // Eurasian Chem. Technol. J. – 2009. – Vol.11, №3. – P.245-252.
- [39]. Saito R., Hofmann M., Dresselhaus G., Jorio A., Dresselhaus M.S. Raman spectroscopy of graphene and carbon nanotubes // Adv. Phys. – 2011. – Vol.66, №3. – P.413-550.
- [40]. Atamanov M.K., Noboru I., Shotaro T., Amrousse R., Tulepov M.Y., Kerimkulova A.R., Hobosyan M.A., Hori K., Martirosyan K.S., Mansurov Z.A. Investigation of combustion and thermal analysis of ammonium nitrate with carbonaceous materials // Combust. Sci. Technol. – 2016. – Vol.118, №11-12. – P.2003-2011.
- [41]. Атаманов М.К., Амроусе Р., Хори К., Колесников Б.Я., Мансуров З.А. Влияние активированного угля на термическое разложение нитрата гидроксиламмония // Физика горения и взрыва. – 2018. – Т.54, №3. – С.72-81.
- [42]. Mansurov Z.A. Complete scheme for fullerene, graphene and soot formation in flame // Eurasian Chem.-Technol. J. – 2018. – Vol.20, №4. – P.277-281.

References

- [1]. Ksandopulo GI (1980) Flame Chemistry [Himiya plameni]. Chemistry, Moscow, Russia. (in Russian)
- [2]. Ksandopulo GI, Dubinin VV (1988) Chemistry of gas-phase combustion [Himiya gazofaznogo goreniya]. Chemistry, Moscow, Russia. (in Russian)
- [3]. Ksandopulo GI, Sagindykov AA, Mansurov ZA (1975) Combustion, Explosion and Shock Waves. [Fizika goreniya i vzryva] 11(6):838-843.
- [4]. Westenberg AA, Fristrom RM (1965) H- and O-Atom Profiles Measured by ESR in C₂ Hydrocarbon-O₂ Flames. 10th Symp. Int. On Combustion. Pittsburgh, Pennsylvania. P.373. DOI: 10.1016/S0082-0784(65)80194-1
- [5]. Vos HJ, Wisman WH, Schmidt J (1971) Investigation in Flames. J. Magn. Resonance and Related Phenom. Proc. 16th Congress AMPERE, Bucharest.
- [6]. Friswell NJ, Sutton MM (1972) Chem.Phys.Lett. 15:108. DOI: 10.1016/0009-2614(72)87028-3
- [7]. Fristrom RM (1963) Science. 140(3564):297. DOI: 10.1126/science.140.3564.297
- [8]. Mansurov ZA, Mironenko AV, Zhukova LN, Ksandopulo GI (1978) DAN SSSR [DAN SSSR]. 239:883-885. (in Russian)
- [9]. Mansurov ZA (2001) Detection of hydrogen atoms and their distribution in the front of stabilized cold flames of hydrocarbons [Obnaruzhenie atomov vodoroda i ih raspredelenie vo fronte stabilizirovannykh holodnykh plamen uglevodorodov]. International Conference on Analytical Chemistry. P.87-90.
- [10]. Kubitza Ch, Schotter M, Homana KI (1987) Ber. Bunsenges Phys. Chem. 91:695-700. DOI: 10.1002/bbpc.19870910703
- [11]. Songina OA, Zakharov VA (1970) Amperometric titration [Amperometricheskoe titrovaniye]. Mir, Moscow, Russia. (in Russian)
- [12]. Mansurov ZA (1990) Non-isothermal cold hydrocarbon flames [Neizotermicheskie holodnye plamena uglevodorodov]. Abstract Diss. Doc. chemical sciences. Chernogolovka, USSR. P.48. (in Russian)
- [13]. Gukasyan PS, Mantashyan AA, Sayadyan RA (1976) Combustion, Explosion and Shock Waves [Fizika goreniya i vzryva] 12(5):789. (in Russian)
- [14]. Lignola PO, Reverchon E (1987) Progress in Energy and Combustion Science 13:75-96. DOI:10.1016/0360-1285(87)90007-4
- [15]. Mansurov ZA (2009) Formation of fullerenes and carbon nanotubes in hydrocarbon flames. Int. Conference Carbon, Biarritz, France. P.70.
- [16]. Chenchik DI, Mansurov ZA, Shabanova TA, Orynshaikh T (2007) Obtaining carbon nanotubes in a counter-jet burner [Poluchenie uglerodnykh nanotrubok v gorelke na vstrechnykh struyah]. Proc. of the IV Int. Symp. Combust. and Plasma Chemistry. Almaty, Kazakhstan. P.288-290. (in Russian)
- [17]. Mansurov ZA, Merkulov AA, Popov VT, Tuleutaev BK, Almazov NS (1994) Chemistry of Solid Fuel [Himiya tverdogo topliva]. 3:83-86. (in Russian)
- [18]. Mansurov ZA, Tuleutaev VK, Pesterev VI (1989) Petrochemistry [Neftekhimiya]. 29(2):188-191. (in Russian)
- [19]. Mansurov ZA, Tuleutaev BK, Popov VT (1991) Combustion, Explosion and Shock Waves [Fizika goreniya i vzryva]. 27(1):42-45. (in Russian)
- [20]. Lijima S (1991) Nature 354:56-58. DOI: 10.1038/354056a0
- [21]. Basha JS, Anand RB (2011) J. Power Energy. 225(3):279-288. DOI: 10.1177/2041296710394247
- [22]. Chehroudi B (2016) Propellant Combustion: Graphene Science Handbook, CRC Press, Boca Raton, Florida, USA. P.391-398. DOI: 10.1201/b19488
- [23]. Fowler JD, Allen MJ, Tung VC, Yang Y, Kaner RB, Weiller BH (2009) ACS Nano. 3(2):301-306. DOI: 10.1021/nn800593m
- [24]. Schniepp HC, Li J-L, McAllister MJ, Sai H, Herrera-Alonso M, Adamson DH, Aksay IA (2006) J. Phys. Chem. B. 110(17):8535-8539. DOI: 10.1021/jp060936f
- [25]. McAllister MJ, Li J-L, Adamson DH, Schniepp HC, Abdala AA, Liu J, Aksay IA (2007) Chem. Mater. 19(18):4396-4404. DOI: 10.1021/cm0630800
- [26]. Ramanathan T, Abdala AA, Stankovich S, Dikin DA, Herrera Alonso M, Piner RD, Brinson LC (2008) Nature Nanotechnol. 3(6):327-331. DOI: 10.1038/nnano.2008.96
- [27]. Chehroudi B (2011) Recent Patents on Space Technology. 1(2):107-122. DOI: 10.2174/1877611611101020107
- [28]. Sabourin JL, Dabbs DM, Yetter RA, Dryer FL, Aksay IA (2009) ACS Nano. 3(12):3945-3954. DOI: 10.1021/nn901006w
- [29]. Ishitha K, Ramakrishna PA (2014) Int. J. Adv. Eng. Sci. Appl. Math. 6(1-2):76-92. DOI: 10.1007/s12572-014-0112-z
- [30]. Verma S, Ramakrishna PA (2013) J. Propul. Power. 29(5):1214-1219. DOI: 10.2514/1.B34809
- [31]. Verma S, Ramakrishna PA (2010) Combust. Flame. 157(6):1202-1210. DOI: 10.1016/j.combustflame.2009.11.017
- [32]. Di Capua R, Gargiulo V, Alfe M (2016) Eurasian Chem.-Technol. J. 18(4):263-274. DOI: 10.18321/ectj480
- [33]. Seo JS, Whang D, Lee H, Jun SI, Oh J, Jeon YJ, Kim K (2000) Nature. 404(1):982-986. DOI: 10.1038/35010088
- [34]. Srinivas G, Burrell JW, Ford J, Yildirim T (2011)

- J. Mater. Chem. 30(30):11323. DOI: 10.1039/c1jm11699a
- [35]. Burress JW, Gadipelli S, Ford J, Simmons JM, Zhou W, Yildirim T (2010) *Angew. Chemie*. 122(47):9086-9088. DOI: 10.1002/ange.201003328
- [36]. Rozhkov AV (2017) *Chemistry and Life – XXI century* [Himiya i zhizn' – XXI vek]. 10:2-7. (in Russian)
- [37]. Seitzhanova MA, Kerimkulova MR, Shyntoreev EB, Azat S, Kerimkulova AR, Mansurov ZA (2015) *Chemical Bulletin of Kazakh National University*. 2:37-41. DOI: 10.15328/cb569
- [38]. Jandosov JM, Shikina NV, Bijsenbayev MA, Shamalov ME, Ismagilov ZR, Mansurov ZA (2009) *Eurasian Chem. Technol. J.* 11(3):245-252. DOI: 10.18321/ectj287
- [39]. Saito R, Hofmann M, Dresselhaus G, Jorio A, Dresselhaus MS (2011) *Adv. Phys.* 66(3):413-550. DOI: 10.1080/00018732.2011.582251
- [40]. Atamanov MK, Noboru I, Shotaro T, Amrousse R, Tulepov MY, Kerimkulova AR, Hobosyan MA, Hori K, Martirosyan KS, Mansurov ZA (2011) *Combust. Sci. Technol.* 118(11-12):2003-2011. DOI: 10.1080/00102202.2016.1220143
- [41]. Atamanov MK, Amrousse R, Hori K, Kolesnikov BYa, Mansurov ZA (2018) *Combustion, Explosion and Shock Waves* [Fizika gorenija i vzryva] 54(3):72-81. (in Russian)
- [42]. Mansurov ZA (2018) *Eurasian Chem.-Technol. J.* 20(4):277-281.

Chemistry of gas-phase combustion and soot formation

Z.A. Mansurov

Institute of Combustion Problems, 172, Bogenbai batyr str., Almaty, Kazakhstan

Abstract

This article is dedicated to the memory of the teacher, professor, academician of the ATS G.I. Xandopulo. Below is an overview of the work on the study of the structure of the hydrocarbon flame front, carried out under the guidance of G.I. Ksandopulo, as well as data on the study of the formation of fullerenes and carbon nanotubes during the combustion of hydrocarbons, obtained recently at ICP. The article reviews the author's work on the study of the structure of the front of cold flames of diethyl ether and butane, the pre-flame zone of normal propane flames and soot formation during the combustion of

hydrocarbons. Gorenje. The phenomenology, kinetics and mechanism of soot formation, the influence of various factors on the formation of polycyclic aromatic hydrocarbons (PCAU), carbon nanotubes, fullerenes, graphenes and soot are considered.

- Low-temperature zone of the front of hydrocarbon flames
 - Cold flames
 - Non-isothermal cold diethyl ether flames
 - Detection of hydrogen atoms and their distribution in the front of stabilized cold hydrocarbon flames
 - Synthesis of carbon nanotubes in combustion mode
 - Soot formation during methane combustion in an electric field
 - New nanocarbon energy-intensive materials
- Keywords: flame front structure, hydrogen atoms, peroxide radicals, soot formation.

Газ фазалық жану және күйе түзілу химиясы

З.А. Мансұров

Жану мәселелері институты, Қазақстан, Алматы қ., Бөгенбай батыр көш., 172

Аңдатпа

Бұл мақала оқытушы, профессор, АТС академигі Г.И. Ксандопуло. Төменде Г.И. жетекшілігімен жүргізілген көмірсутекті жалын фронтының құрылымын зерттеу жұмыстарының шолуы берілген. Ксандопуло, сондай-ақ көмірсутектерді жағу кезінде фуллерендер мен көміртекті нанотүтіктердің түзілуін зерттеу туралы мәліметтер, жақында ICP-да алынған. Мақалада автордың диэтил эфирі мен Бутанның суық жалын фронтының құрылымын, пропанның қалыпты жалынының жалын алдындағы аймағын және көмірсутектердің жануы кезінде күйе түзілуін зерттеу жөніндегі жұмыстарына шолу жасалды. Gorenje. Феноменология, кинетика және күйе түзілу механизмі, полициклді хош иісті көмірсутектердің (пцау), көміртекті нанотүтікшелердің, фуллерендердің, графендердің және күйенің түзілуіне әртүрлі факторлардың әсері қарастырылды.

- Көмірсутекті жалын майданының төмен температуралы аймағы
- Суық жалындар

- Диэтил эфирінің изотермиялық суық жалыны
- Сутегі атомдарын анықтау және олардың тұрақтандырылған суық көмірсутек жалының майданында таралуы
- Синтездеу көміртекті нанотүтікшелерді жану режимінде

- Жану кезінде күйенің түзілуі метанның электр өрісінде
 - Жаңа нанокөміртекті энергияны қажет ететін материалдар
- Кілт сөздер: жалынның алдыңғы құрылымы, сутегі атомдары, пероксид радикалдары, күйе түзілуі.