

САЖЕОБРАЗОВАНИЕ ПРИ ГОРЕНИИ УГЛЕВОДОРОДОВ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ

З.А. Мансуров

¹Институт проблем горения, ул. Богенбай батыра, 172, Алматы, Казахстан

²КазНУ имени аль-Фараби, пр. аль-Фараби, 71, Алматы, Казахстан

АННОТАЦИЯ

В настоящем мини обзоре, посвященном 75-летию крупного ученого в области плазмохимии, профессору Владимиру Ефремовичу Мессерле, рассмотрено сажеобразование при горении углеводородов в электрическом поле. Дан исторический экскурс исследований горения углеводородов в электрическом поле. Изучены процессы сажеобразования при горении метанкислородной смеси в электрическом поле при изменении прикладываемого потенциала от 0 до 2,2 кВ при разной полярности электродов. Установлено, что при наложении электрического поля происходит уменьшение размеров сажевых частиц и выхода сажи; кроме того, при применении поля, ускоряющего положительно заряженные частицы, уменьшается межплоскостное расстояние.

Ключевые слова: сажеобразование, электрическое поле, механизм горения.

1. Введение

Влияние электрического поля на процессы горения углеводородов представляет большой интерес для направленного химического синтеза и управления сажеобразованием в экологических целях. В [1] установлено, что даже электрическое поле малой напряженности существенно влияет на кинетику горения. Процесс образования сажи в углеводородном пламени в значительной степени определяется тем, что частица сажи в пламени приобретает положительный заряд [2-5]. Этот процесс можно контролировать с помощью внешних электрических полей. Следует отметить, что обычно такие исследования проводят с использованием лабораторных плоских горелок, в которых матрица служит катодом, а анод располагается над горелкой в виде пластинки с отверстиями для отвода газов [1].

Влияние электрического поля на пламя впервые наблюдал в 1814 году Бранде [2], который обнаружил, что поведение пламени существенно меняется, когда пламя помещается

между двумя электродами. Было обнаружено, что влияние электрического поля на тепло- и массоперенос настолько сильно, что и пламя, и сажа начинают двигаться к отрицательно заряженному электроду. Таким образом, Бранде был первым, кто повлиял на скорость распространения пламени, применив электрическое поле.

В [3-4] отмечено, что взаимодействие электрического поля с пламенем позволяет изменять скорость горения. Отдельной областью исследований является использование электрических полей и разрядов для изменения скорости распространения пламени. Применяя электрическое поле, можно уменьшить скорость распространения пламени по каналу и даже погасить пламя [5] или, наоборот, ускорить скорость горения, увеличив скорость сдувания пламени [6]. Эта область исследований открывает большие перспективы и является довольно сложной для практических приложений, таких как авиационные двигатели, в которых сгорание должно быть как можно более быстрым и полным. Более быстрое сгорание

*Ответственный автор

E-mail: zmansurov@kaznu.edu.kz (З.А. Мансуров)

позволяет использовать более обедненные смеси, что приводит к снижению температуры продуктов сгорания и уменьшению количества образующихся NO_x [4].

Пламя – это низкотемпературная плазма со средней энергией частиц 0,2 эВ. Эта плазма состоит в основном из молекул и радикалов, а также электронов и положительно заряженных ионов, образующихся в результате химической или термической ионизации. Расчеты равновесного состава продуктов сгорания углеводородно-воздушной смеси при атмосферном давлении и температуре, соответствующей адиабатическому равновесию (выше 2000 К), по уравнению Саха дают плотность электронов менее 10^8 см^{-3} , тогда как общая плотность молекул, радикалов и атомов составляет 10^{18} см^{-3} [4]. По этой причине в литературе рассматриваются следующие два механизма (помимо Джоулева нагрева), посредством которых электрическое поле влияет на характеристику пламени. При низких приведенных полях, недостаточных для возбуждения компонентов смеси (несколько сотен вольт на сантиметр при атмосферном давлении), решающую роль играет так называемый «ионный ветер» (вызванное электрическим полем перераспределение заряженных частиц, а также нейтральных атомов и молекул, которые приходят в движение в результате резонансных процессов обмена зарядами). Лоутоном и Вайнбергом [7] было показано, что электрические силы внутри пламени могут превышать конвективные силы более чем на два порядка. Эффект особенно ярко проявляется в случае медленных диффузионных пламен, скорости распространения которых намного ниже, чем у пламени с предварительным смешением [8]. При более высоких электрических полях важное значение приобретают процессы возбуждения, диссоциации и ионизации газа электронным ударом. Эти процессы приводят к появлению новых химически активных видов и дополнительных механизмов взаимодействия, которые изменяют и ускоряют кинетику системы. Энергия электронов в этом случае должна быть достаточно высокой для электронного и колебательного возбуждения молекул, поэтому данный диапазон электрических полей в целом соответствует развитию газового разряда [3].

В [9] проведен анализ взаимодействия ионов и электронов во фронте пламени с сажевыми частицами и исследованы особенности динамики зарядки сажевых частиц при их взаимодействии.

В плазме, образующейся при горении углеводородного топлива (температура $T_c = 1500\text{--}2500 \text{ К}$, давление $p_c = 10^4\text{--}10^6 \text{ Па}$), сажевые частицы обычно имеют лог нормальное распределение по размеру. В зависимости от давления и температуры газа, а также размера сажевых частиц в плазме могут реализовываться разные режимы взаимодействия ионов с сажевыми частицами. При $\lambda > a$, где λ – длина свободного пробега иона (электрона), взаимодействие происходит в кинетическом режиме. В этом случае полный поток ионов через сферу захвата, концентрически расположенную с сажевой частицей и имеющую радиус $\rho^{(P)} = r_d$ (его величина будет определена ниже), определяется по уравнению [10]

$$I = n(\rho^{(P)} + \lambda)\pi a^2 v E \quad (1)$$

где v – средняя тепловая скорость ионов; $n(\rho^{(P)} + \lambda)$ – концентрация ионов на расстоянии свободного пробега иона, λ , от этой сферы; E – коэффициент, зависящий от характера взаимодействия иона и сажевой частицы. При $\lambda < a$ скорость прилипания ионов определяется скоростью их диффузии к поверхности сферы захвата.

В квазистационарном случае [10]

$$I = 4\pi(\rho^{(P)})^2 (D \partial n / \partial r + \mu F n) \quad (2)$$

где D и μ – коэффициент диффузии и подвижность иона; F – сила, действующая на ион в электрическом поле частицы. Вероятность прилипания иона сорта i к частице за время Δt , $L_i = I_i \Delta t$, а коэффициент прилипания иона к частице $\beta_i = I_i / n_{0i}$, где n_{0i} – концентрация ионов сорта i в плазме при $r = \infty$ [9].

Многочисленные экспериментальные исследования, связанные с воздействием электрических полей на пламена, дали обширный материал для теоретического истолкования наблюдающихся эффектов и содействовали их использованию в практических целях [11].

Эти работы, начатые в начале века Томсоном в Англии, Хабером в Германии, Гено и Уиллером во Франции, Малиновским и его сотрудниками в Советском Союзе и продолжающиеся до настоящего времени многочисленными группами в разных направлениях и под разными углами зрения, показали, что взаимодействия постоянных и переменных электрических полей и газовых пламен приводят к различным, иногда противоречивым эффектам, которые в конечном счете могут быть по-

лезно использованы. К таким эффектам относятся изменение формы, площади поверхности и скорости распространения пламени в трубах и в свободногорящем факеле в электрических полях, изменение условий воспламенения и погасания иногда во внешнем поле, интенсификация химических реакций, при горении, стабилизация и дестабилизация фронта горения, отклонение и расщепление диффузного факела, сдвиг пламени, образованного потока во внешнем электрическом поле и т.д.

В Институте проблем горения изучено горение сажеобразующего метана в электрическом поле в проточном кварцевом реакторе [1]. 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 [12-13]. 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.

На рис. 1 показана схема кварцевого реактора с расположением электродов. Напряжение (100 А) на электроды подавали от высоковольтного стабилизатора типа ВС. При выборе формы электродов и расстояния между ними руководствовались соображениями наибольшего охвата электрическим полем зоны горения и наименьшего возмущения электродами потока газов в реакторе. В первой серии экспериментов нижний электрод был выполнен в виде спирали, по форме близкой к диску. Верхний электрод представляет собой металлический штырь в кварцевом чехле. Расстояние между электродами – 90 мм. Установлено, что в этом случае пламя стабилизируется на нижнем электроде и значительная часть сажи осаждается на катоде, что приводит к изменению параметров процесса горения. Поэтому в следующей серии экспериментов нижний электрод был помещен в перемычке между секциями реактора, а верхний, выполненный в виде кольца, на котором натянута никелевая сетка, располагался над выходной трубкой (расстояние между электродами – 205 мм). При этом на электродах сажа практически не отлагалась.

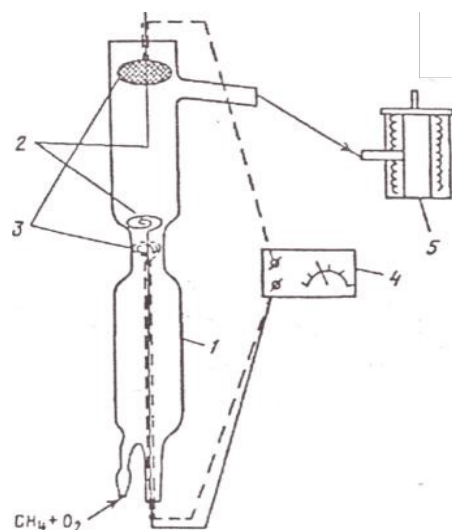


Рис. 1. Схема кварцевого реактора для исследования горения метана в электрическом поле с различным расположением электродов: 1 – двухсекционный реактор; 2, 3 – электроды первой и второй серий экспериментов; 4 – источник питания; 5 – обогреваемый сажесборник.

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 K_{α} -излучение).

На рис. 2а 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. 2а, 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. 2а, кривая 1).

Во второй серии экспериментов (рис. 2а, кривая 3) наблюдали снижение вдвое выхода сажи уже при 0,1 кВ аналогичным показате-

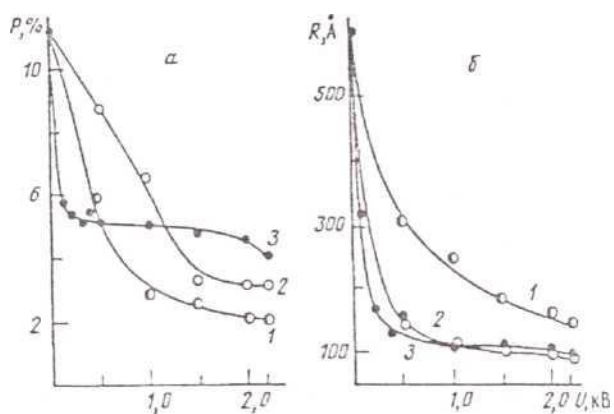


Рис. 2. Зависимость выхода сажи P (а) и размера ее частиц (б) от величины приложенного потенциала при полярности на электродах: 1 – Т; 2 – и; 3 – Т (для 1 и 2 расстояние между электродами – 90 мм, для 3 – 205 мм).

лем, 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. 2б). Следует отметить, что при повышении напряженности поля разброс частиц по размерам уменьшается, образуется более однородная сажа.

Когда направление электрического поля ускоряет положительно заряженные частицы, происходит уменьшение межплоскостного расстояния d_{ml} в полученных сажах (таблица 1). Например, при 2,2 кВ значение $d_{002} = 3,50$ Å, а при наложении поля с обратной полярностью изменение межплоскостного расстояния незначительно ($d_{002} = 3,57$ Å).

Во второй серии экспериментов, как видно из таблицы, наблюдали уменьшение d_{002} с 3,58 до 3,52 Å при увеличении U от 0 до 0,4 кВ.

Качественное объяснение наблюдаемых явлений возможно с использованием представлений о влиянии электрического поля на сажеобразующее пламя вследствие наличия в них заряженных частиц [3, 5, 6]. Такое воздействие определяется термоионизационными процессами в больших углеводородных молекулах и процессами обмена заряда между частицей сажи и окружающим ее облаком других заряженных частиц.

В случае наложения электрического поля таким образом, когда положительный электрод находится внизу, образующиеся сажевые частицы заряжаются под действием термоэ-

Таблица 1. Рентгеноструктурные характеристики саж с воздействием электрического поля

кВ	Полярность электродов	Количество образовавшейся сажи, %	d_{002}
Первая серия			
–	–	11,21	3,58
0,1	–	–	–
0,2	–	–	–
0,3	–	–	–
0,4	–	–	–
0,5	т	5,9	3,52
1,0	т	4,01	3,52
1,5	т	2,64	3,52
2,0	т	2,02	3,52
2,2	т	2,02	3,50
0,5	+	8,82	3,57
1,0	±	6,62	3,57
1,5		3,06	3,57
2,0	±	3,03	3,57
2,2	±	3,00	3,57
Вторая серия			
–	–	11,21	3,58
0,1	т	–	–
0,2	т	–	–
0,3	т	–	–
0,4	т	–	–
0,5	т	–	–
1,0	т	5,9	3,52
1,5	т	4,01	3,52
2,0	т	2,64	3,52
2,2	т	2,02	3,52
0,5	–	–	–
1,0		2,02	3,50
1,5		–	–
2,0	–	8,82	3,57
2,2	–	6,62	3,57

лектронной эмиссии и, получив положительный заряд, ускоряются внешним полем. Вследствие более быстрого прохождения зоны горения они не успевают вырасти до размеров, характерных для частиц, образующихся при отсутствии поля, что приводит к уменьшению веса сажи. Это направление электрического поля влияет на наиболее ранние стадии образования сажевых частиц, что подтверждает

ется и впервые обнаруженным изменением межслоевого расстояния d_{002} .

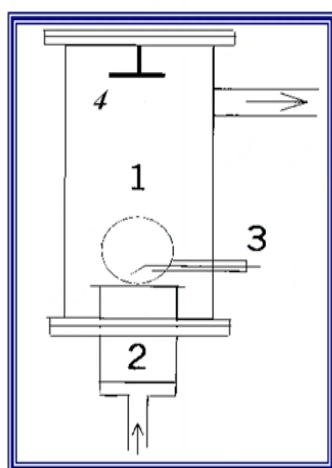
В случае противоположного направления электрического поля (положительный электрод вверху) сажевые частицы задерживаются полем в области отрицательных зарядов. При одновременном воздействии термоэлектронной эмиссии и перезарядки преобладающим механизмом получения заряда является перезарядка. При этом сажевые частицы, образующиеся в зоне положительного заряда и заряженные положительно, после прохождения зоны отрицательного заряда перезаряжаются и ускоряются внешним электрическим полем.

На рис. 3 представлена экспериментальная

горелка для синтеза сажи, которая состоит из кварцевого реактора с наложением электрического поля [14, 15].

На рис. 4 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.

В июне 1990 года я защитил докторскую диссертацию в Институте структурной макрокинеки АН ССР на тему «Неизотермические холодные пламена углеводорода», и перед защитой 15 марта я приехал во ВНИИ ТУ (Омск)



- C/O=1.0
- P=40 Torr
- Benzene - $Q_1=250 \text{ cm}^3/\text{min}$
- Oxygen - $Q_2=758 \text{ cm}^3/\text{min}$
- Argon - $Q_3=101 \text{ cm}^3/\text{min}$
- V=18.4 cm/s
- T=1200K
- $\delta=0.5 \div 0.8 \text{ cm}$
- The electrode system a needle - plane, plane - plane, кольцо - plane with interelectrode distance L=18; 21; 4 cm;
- U=0.5...20 kV

Рис. 3. Схема горелки и параметры эксперимента для синтеза сажи при низком давлении: 1 – кварцевый реактор; 2 – горелка; 3 – электрод для поджога; 4 – электрод для наложения электрического поля.

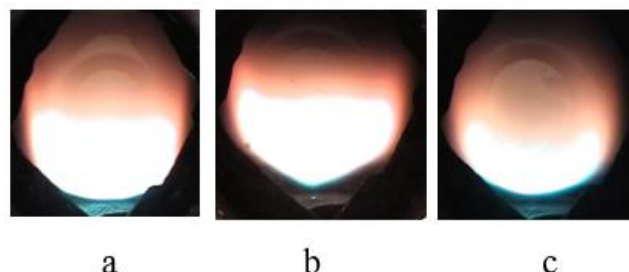
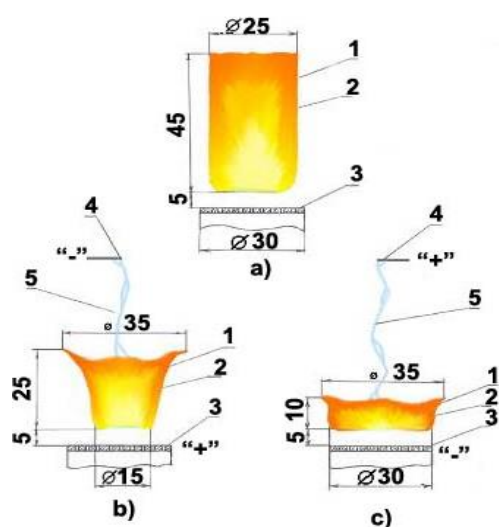


Рис. 4. Высота пламени при отрицательной полярности уменьшалась на 45%, а при положительной полярности на 80%: а – без наложения электрического поля; б – при суперпозиции электрического поля отрицательной полярности, U=10 кВТ; в – при наложении электрического поля положительной полярности, U=10 кВТ; 1 – фронт пламени; 2 – центральная светящаяся часть; 3 – матрица горелки; 4 – верхний электрод – игла; 5 – светящийся шнур тлеющего разряда.

с кандидатом химических наук В.Т. Поповым (Институт нефтехимического синтеза, Москва). Нас принял директор института, д.т.н., лауреат Ленинской премии Виталий Федорович Сурувикин 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 зам. директора С.В. Ореховым. Данное внедрение и в настоящее время является актуальным.

2. Сравнение ионного механизма образования сажи со свободнорадикальным механизмом [17]

Ионы могут участвовать в образовании сажи в пламенах с высоким содержанием топлива на трех стадиях:

- зародышеобразование;
- коагуляция крупных атомарных ионов;
- коагуляция частиц сажи.

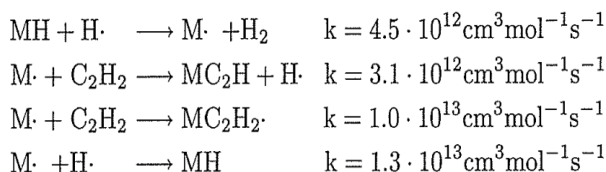
Таким образом, энергия E для удаления электрона с частицы диаметром d составляет:

$$E = V + \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 d}$$

где V = рабочая функция материала, e = заряд электрона; ϵ_0 = диэлектрическая проницаемость свободного пространства. Такая же общая тенденция наблюдается и для ионов: чем больше ион, тем меньше свободная энергия на единицу массы.

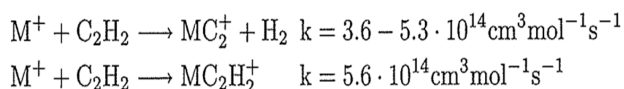
Для отдельных концентраций ионов использованы данные, измеренные в AeroChem, на горелке, идентичной той, которую использовали Bittner et al. Общие концентрации были подтверждены Gerhardt [18].

Для механизма свободных радикалов использован механизм Френкляха и использованы константы скорости [19] для конкретных реакций. Френклях использует четыре элементарных типа реакций в механизме свободных радикалов, а именно с их константами скорости:



где M – большие реагирующие частицы.

Ионный механизм требует в основном двух элементарных реакций:



Константы скорости ионно-молекулярных реакций рассчитываются по теории Ланжевена и корректируются таким образом, чтобы скорость обратных реакций, рассчитанная по термодинамическому равновесию, никогда не превышала скорость Ланжевена [17].

На любом расстоянии от горелки концентрация каждого вида углеродных частиц постоянна в равновесном состоянии. Следовательно, поток концентрации (моль*см⁻¹*с⁻¹) молекул в схеме линейной реакции может быть оценен по скорости производства, рассчитанной по локальной концентрации предшествующей. Интегрирование, при условии постоянных концентраций, дает характерное время, необходимое для получения фиксированной концентрации n молекулы на основе экспериментальных концентраций реагирующих частиц:

$$\tau \frac{n}{k[A][B]}$$

Суммирование времени каждой реакции, необходимой для перехода n малых частиц в n большие частицы, является мерой общего времени роста.

Рассмотрим свободно радикальный и ионный механизмы по присоединению 10 атомов углерода (рис. 5-6).

Основанного на измерениях концентрации, проведенных Биттнером и Ховардом [20].

Таким образом, сажеобразование по ионному механизму в четыре раза быстрее свободнорадикального.

Образование супергидрофобных поверхностей, это такие поверхности, на которых капли воды не растекаются. Угол контакта больше 90 градусов.

		Time, μs				Time, μs	
		Forward	Reverse			Forward	Reverse
$C_{10}H_8$							
↓	+ H• (-H ₂)	0.75	0.35				
$C_{10}H_7\bullet$							
↓	+ C ₂ H ₂ (-H•)	0.05	0.05	↓	Cyclizes	0.0	
$C_{12}H_8$				$C_{16}H_9\bullet$			
↓	+ H• (-H ₂)	1.42	0.16	↓	+ C ₂ H ₂ (-H•)	0.39	0.36
$C_{12}H_7\bullet$				$C_{18}H_{10}$			
↓	+ C ₂ H ₂	0.04	$7 \cdot 10^{-6}$	↓	+ H• (-H ₂)	10.5	1.15
$C_{14}H_9\bullet$				$C_{18}H_9\bullet$			
↓	Isomerizes	0.0		↓	+ C ₂ H ₂	0.32	$3 \cdot 10^{-5}$
$C_{14}H_9\bullet$				$C_{20}H_{11}\bullet$			
↓	+ C ₂ H ₂ (-H•)	0.27	0.20	↓	Isomerizes	0.0	
$C_{16}H_{10}$				$C_{20}H_{11}\bullet$			
↓	+ H• (-H ₂)	5.85	0.69	↓	+H•	5.00	132
$C_{16}H_9\bullet$				$C_{20}H_{12}$			
Total Time Forward = 25 μs							

Рис. 5. Свободнорадикальный механизм, общее время составляет 25 мкс [17].

		Time, μs	
		Forward	Reverse
$C_{11}H_9^+$			
↓	+ C ₂ H ₂ (-H ₂)	3.6	240
$C_{13}H_9^+$			
↓	+ C ₂ H ₂	0.51	$1.9 \cdot 10^{-4}$
$C_{15}H_{11}^+$			
↓	+ C ₂ H ₂ (-H ₂)	0.64	14
$C_{17}H_{11}^+$			
↓	+ C ₂ H ₂ (-H ₂)	1.3	160
$C_{19}H_{11}^+$			
↓	+ C ₂ H ₂ (-H ₂)	0.65	20
$C_{21}H_{11}^+$			
Total Time Forward = 6.7 μs			

Рис. 6. Ионный механизм, общее время составляет 6.7 мкс [17].

Данные (рис. 7-9), полученные М. Нажипкызы, показывают, что при наложении электрического поля образуются сажевые частицы с меньшим диаметром [22-23]. При наложении электрического поля 1 кВ диаметр сажевых частиц уменьшается.

3. Заключение

Проведен краткий анализ работ по влиянию внешнего электрического поля на сажеобразование, на выход и структурные характеристики продуктов сгорания. Проведено



Рис. 7. Экспериментальная установка.

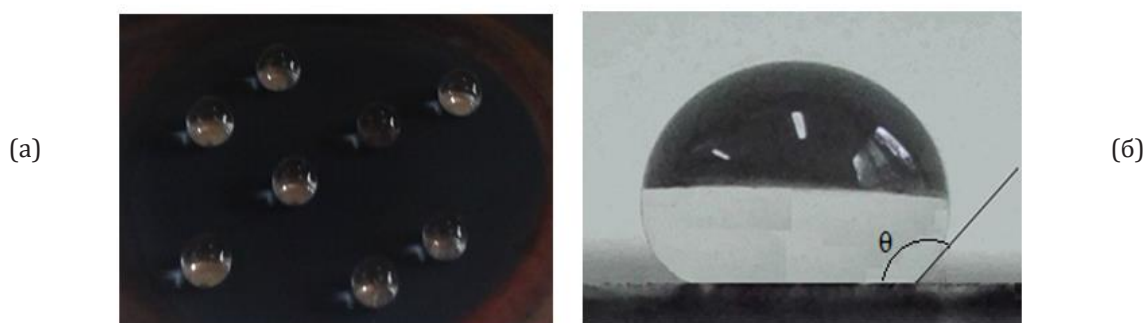


Рис. 8. Поведение капель воды на поверхности кварцевой пластины, покрытой слоем гидрофобной сажи: а – сажа, полученная сжиганием пропана с использованием никелевого катализатора; б – капля жидкости, помещенная на центральную супергидрофобную область.

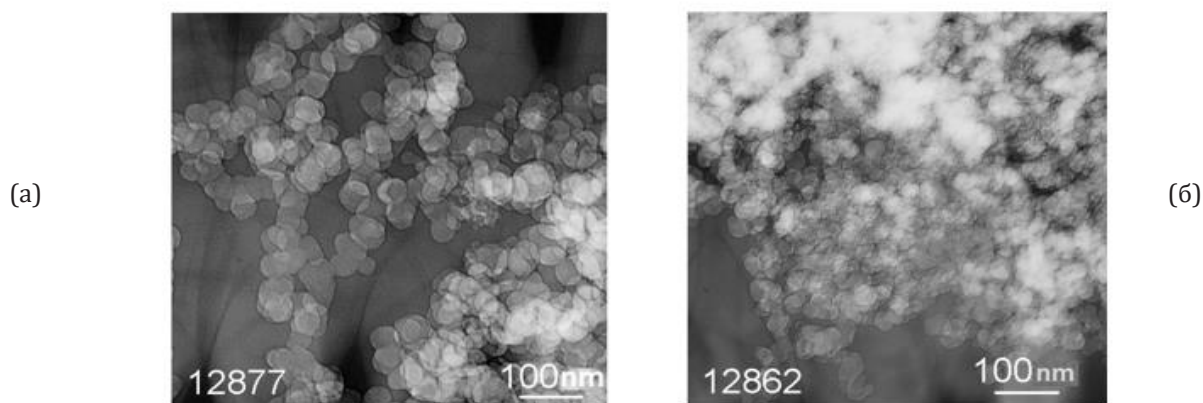


Рис. 9. Сканирующие электронные микрофотографии сформированных цепей: а – без применения электрического поля; б – с приложением электрического поля напряжением 1 кВ.

сравнение свободнорадикального и ионного механизмов сажеобразования и образования супергидрофобных углеродных поверхностей при горении углеводородов без наложения и с наложением электрического поля и его влияние на размеры сажевых частиц.

Литература

- [1]. 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.
- [2]. Brande W.T. The Bakerian Lecture: on some

- new electro-chemical phenomena // *Philas. Trans. R. Soc.* – 1814. – Vol.104. – P.51–61.
- [3]. Starikovskii A.Yu. Plasma supported combustion // *Proceedings of the Combustion Institute.* – 2005. – Vol.30. – P.2405–2417.
- [4]. Malinovsky A.E. (1924) *J. Chem. Phys. Paris* – Vol.21. – P.469.
- [5]. Calcote H.F. Effect of dc Electric Field on Burner Flame. Princeton University. Project squid Technical Report, 1946.
- [6]. Lawton J., Weinberg F.J. *Electrical Aspects of Combustion.* Clarendon Press, Oxford, 1969. – 355 p.
- [7]. Fialkov A.B. Investigations on ions in flames // *Prog. Energy Combust. Science.* – 1997. – Vol.23. – P.399–528.
- [8]. Савельев А.М., Старик А.М. Особенности взаимодействия ионов и электронов с наночастицами в плазме, образующейся при горении углеводородного топлива // *Журнал технической физики.* – 2006. – Т.76, №4. – С.53–60
- [9]. Jellum G., Graves D. Particulates in aluminum sputtering discharges // *J. Appl. Phys.* – 1990. – Vol.67, №10. – P.6490–6496.
- [10]. Hoppel A.W., Frick G.M. Ion—Aerosol Attachment Coefficients and the Steady-State Charge Distribution on Aerosols in a Bipolar Ion Environment // *Aerosol Sci. Technology.* – 1986. – Vol.5, №1. – P.1–21.
- [11]. Кидин Н.И., Либрович В.Б., Махвиладзе Г.М. Электрические свойства ламинарных пламен // *Институт проблем механики АН СССР, Москва 1975. Предпринт №51.* – 55 с.
- [12]. Мансуров З.А., Тулеутаев В.К., Пестерев В.И. Использование полиароматических углеводородов – продуктов низкотемпературного горения метана // *Нефтехимия.* – 1989. – Т.29, №2. – С.188–191.
- [13]. Мансуров З.А., Тулеутаев Б.К., Попов В.Т. и др. // *Физика горения и взрыва.* – 1991. – Т.27, №1. – С.42–45.
- [14]. Приходько Н.Г., Лесбаев Б.Т., Машан Т.Т., Мансуров З.А. Сажеобразование при горении бензол-кислородной смеси в электрическом поле при давлении 40 Торр // *Горение и Плазмохимия.* – 2004. – Т.3, №1. – С.59–71.
- [15]. Мансуров З.А. Получение наноматериалов в процессах горения // *Физика горения и взрыва.* – 2012. – Т.48, №5. – С.1–10.
- [16]. Mansurov Z.A. Soot formation. Kazakh University, Almaty, Kazakhstan, 2015. – P.167. ISBN 978-601-04-0730-5.
- [17]. Haetwool F Calcote, Robert J. Gill. Comparison of the Ionic Mechanism of soot formation with a free radical mechanism // *Soot formation in Combustion* / ed. H. Bockhorn. Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, Germany, 1994. ISBN 3-540-58398.
- [18]. Gedhardt P., Homann K.H. Ions and charged soot particles in hydrocarbon flames I. Nozzle beam sampling: Velocity, energy, and mass analysis; total ion concentrations // *Comst. Flame.* – 1990. – Vol.81. – P.289–303.
- [19]. Frenklach M., Warnatz J. Detailed Modeling of PAH Profiles in a Sooting Low-Pressure Acetylene Flame // *Combust. Sci. Technol.* – 1987. – Vol.51. – P.265.
- [20]. Bittner J.D., Howard J.B.: Preparticle chemistry in soot formation // *Particulate carbon: formation during combustion*, ed. By D.G. Siegl, G.W. Smith. Plenum Press, New York. – 1981. – 109p.
- [21]. Calcote H.F., Olson D.B., Kiel D.G. Are ions important in soot formation? // *Energy Fuels.* – 1988. – Vol.2. – P.494–504.
- [22]. Mansurov Z.A., Nazhipkyzy M., Lesbaev B.T., Puri I.K. Synthesis of superhydrophobic carbon surface during combustion propane // *Oil and gas.* – 2010. – Vol.5. – P.27–33.
- [23]. Mansurov Z.A., Nazhipkyzy M., Lesbaev B.T., Auyelkhanzyzy M., Puri I.K. Synthesis of superhydrophobic carbon surface during combustion propane // *Eurasian chemico-technological journal.* – 2012. – Vol.14, №1. – P.19–23.

References

- [1]. Mansurov ZA, Merkulov AA, Popov VT, Tuleutaev BK, Almazov NS (1994) *Chemistry of Solid Fuel [Himiya tverdogo topliva]* 3:83–86. (in Russian)
- [2]. Brande WT (1814) *Philas. Trans. R. Soc.* 104:51–61. DOI:10.1098/rstl.1814.0005
- [3]. Starikovskii AYU (2005) *Proceedings of the Combustion Institute* 30:2405–2417. DOI:10.1016/j.proci.2004.08.272
- [4]. Malinovsky AE (1924) *J. Chem. Phys. Paris* 21:469. DOI:10.1177/003463732402100417
- [5]. Calcote HF (1946) Effect of dc Electric Field on Burner Flame. Princeton University. Project squid Technical Report.
- [6]. Lawton J, Weinberg F (1969) *Electrical Aspects of Combustion.* Clarendon Press, Oxford. ISBN:0198553412
- [7]. Fialkov AB (1997) *Prog. Energy Combust. Science* 23:399–528. DOI:10.1016/S0360-1285(97)00016-6
- [8]. Savelyev AM, Starik AM (2006) *Journal of technical physics [Zhurnal tekhnicheskoy fiziki]* 76(4):53–60. (in Russian)
- [9]. Jellum G, Graves D (1990) *J. Appl. Phys.* 67(10):6490–6496. DOI:10.1063/1.346081
- [10]. HoppelAW, FrickGM (1986) *AerosolSci. Technol.* 5(1):1–21. DOI:10.1080/02786828608959073
- [11]. Kidin NI, Librovich VB, Makhviladze GM

- (1975) Electrical properties of laminar flames [Elektricheskie svoystva laminarnykh plamen] Institute for Problems in Mechanics of the Academy of Sciences of the USSR, Moscow, USSR. Preprint No.51. (in Russian)
- [12]. Mansurov ZA, Tuleutaev VK, Pesterev VI and others (1989) Petrochemistry. 29(2):188–191. (in Russian)
- [13]. Mansurov ZA, Tuleutaev VK, Popov VT, etc. (1991) Physics of combustion and explosion [Fizika goreniya i vzryva] 27(1):42–45. (in Russian)
- [14]. Prikhodko NG, Lesbaev BT, Mashan TT, Mansurov ZA (2004) Combustion and Plasmachemistry [Gorenie i Plazmohimiya] – 3(1):59–71. (in Russian)
- [15]. Mansurov ZA (2012) Physics of combustion and explosion [Fizika goreniya i vzryva] 48(5):1–10. (in Russian)
- [16]. Mansurov ZA (2015) Soot formation. Kazakh University, Almaty, Kazakhstan. ISBN 978-601-04-0730-5.
- [17]. Haetweel F Calcote, Robert J. Gill (1994) Soot formation in Combustion. ed. H. Bockhorn. Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, Germany. ISBN 3-540-58398. DOI:10.1007/978-3-642-85167-4_26
- [18]. Gedhardt P, Homann KH (1990) Comst. Flame 81:289-303. DOI:10.1016/0010-2180(90)90026-N
- [19]. Frenklach M, Warnatz J (1987) Combust. Sci. Technol. 51:265. DOI:10.1080/00102208708960325
- [20]. Bittner JD, Howard JB (1981) Preparticle chemistry in soot formation. Particulate carbon: formation during combustion, ed. By Siegl DG, Smith GW. Plenum Press, New York, USA. DOI:10.1007/978-1-4757-6137-5_5
- [21]. Calcote HF, Olson DB, Kiel DG (1988) Energy Fuels 2:494-504. DOI: 10.1021/ef00010a016
- [22]. Mansurov ZA, Nazhipkyzy M, Lesbaev BT, Puri IK (2010) Oil and gas 5:27-33.
- [23]. Mansurov ZA, Nazhipkyzy M, Lesbaev BT, Auyelkhanzyzy M, Puri IK (2010) Eurasian chemico-technological journal. 14(1):19-23. DOI:10.18321/ectj94

Soot formation during the combustion of hydrocarbons in an electric field

Z.A. Mansurov

¹Institute of Combustion Problems, 172, Bogenbay Batyra Str., Almaty, Kazakhstan

²Al-Farabi Kazakh National University, 71, Al-Farabi ave., Almaty, Kazakhstan

Abstract

In this mini review, dedicated to the 75th anniversary of a prominent scientist in the field of plasma chemistry, Professor Vladimir Efremovich Messerle, soot formation during the combustion of hydrocarbons in an electric field is considered. This is a historical excursus of research on the combustion of hydrocarbons in an electric field.

Keywords: soot formation, electric field, combustion mechanism.

Көмірсутектердің электр өрісінде жануы кезінде күйе түзілуі

З.А. Мансуров

¹Жану проблемалары институты, Бөгенбай батыр көш., 172, Алматы, Қазақстан

²Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, әл-Фараби даңғылы, 71, Алматы, Қазақстан

Аңдатпа

Плазмахимия саласындағы көрнекті ғалым, профессор Владимир Ефремович Мессерленің 75 жылдығына арналған бұл шағын шолуда электр өрісінде көмірсутектердің жануы кезінде күйе түзілуі қарастырылады. Бұл электр өрісінде көмірсутектердің жануы бойынша зерттеулердің тарихи экскурсиясы.

Кілт сөздер: күйе түзілу, электр өрісі, жану механизмі.