

зующиеся при разрыве окисной пленки и при последующем накоплении окиси на частице в процессе горения. При высоких давлениях в каждый момент времени на поверхности частиц алюминия находится большое количество мельчайших частиц окиси. При отборе последние кристаллизуются, образуя скорлупку с малой толщиной стенки.

При низких давлениях «нашлепки» окиси, будучи непроницаемыми для газообразных продуктов, отключают значительную часть поверхности частицы от парофазного горения и тем самым уменьшают скорость горения частицы. При значительном накоплении окиси на поверхности частиц алюминия в определенных неблагоприятных внешних условиях вследствие существенного уменьшения теплоприхода и увеличения теплопотерь возможно погасание частиц алюминия. Это имеет место при горении «сверхкрупных» частиц на поверхности, когда горение частиц идет при пониженной температуре среды и при колебании концентрации окислителя, обусловленном локально-колебательным режимом горения [2]. При погасании парофазное горение переходит в гетерогенное, при котором нарастание толщины окисной пленки приводит к полному прекращению горения.

Влияние размера частиц алюминия на режим их горения определяет зависимость давления (граница низких и высоких давлений) от дисперсности частиц, поставляемых с поверхности горения в газовую фазу. При снижении размера частиц это давление увеличивается, и наоборот. Сформулированное отличие в режиме горения частиц алюминия при низких и высоких давлениях объясняет ранее полученные результаты по влиянию давления на полное сгорание различных алюминийсодержащих смесевых конденсированных систем [1].

*Поступила в редакцию
24/VI 1980*

ЛИТЕРАТУРА

1. В. А. Бабук, В. П. Белов, Г. Г. Шелухин. ФГВ. 1978. 14. 3. 145.
2. Г. Г. Шелухин, В. Ф. Булдаков, В. П. Белов. ФГВ, 1969, 5, 1, 42.
3. Т. Бржустовский, Ч. Гласмен.— В сб.: Гетерогенное горение. М., Мир, 1967.
4. J. Crump, J. Prentice, K. Kraeutle. Comb. Sci. and Techn., 1969, 1, 205.
5. Л. А. Клячко. ФГВ, 1969, 7, 3, 404.

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМА ВЛИЯНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ НА ГОРЕНИЕ В КАНАЛАХ С ИЗОЛИРОВАННЫМИ СТЕНКАМИ

*С. А. Абрюков, В. В. Афанасьев, В. П. Борисов,
Н. А. Медведев
(Чебоксары)*

В настоящее время принято выделять три механизма воздействия внешнего электрического поля на пламя [1—4]: тепловой, механический (точнее электро- и газодинамический) и кинетический. В допробойных электрических полях, когда фронт пламени не касается металлических электродов, а вся ионизация обусловлена химическими реакциями в пламени, кинетический и тепловой механизмы не играют практически ника-

кой роли. В то же время электро- и газодинамические эффекты, вызванные появлением во внешнем электрическом поле заряженных областей и электрических массовых сил, оказывают значительное влияние на гидродинамику процессов горения. Электро- и газодинамические эффекты должны также проявляться, когда исследуется влияние внешнего поля при горении между изолированными электродами.

В данной работе экспериментально исследовалось пламя, помещенное в поперечное электрическое поле между двумя изолированными электродами. В случае изоляции электродов условий для прохождения тока во внешней цепи, казалось бы, нет, что не должно позволять частицам непрерывно двигаться по силовым линиям поля. Однако и в этом случае наблюдается гидродинамический эффект влияния электрического поля [5, 6], причем, как отмечают некоторые авторы, от введения изоляторов картина качественно не меняется [7]. Все это позволяет сделать вывод, что в каналах с изолированными электродами в присутствии поля существует движение заряженных частиц, вызывающих электро- и газодинамические эффекты.

Эксперименты проводились в двух характерных режимах: 1) распространение пламени в изолированном канале и 2) стабилизированное на бунзеновской горелке кинетическое пламя. Цель экспериментов — регистрация токов во внешней цепи и в зоне пламени.

Распространяющиеся пламена. Эксперименты проводились в полуоткрытом канале квадратного сечения 30×30 мм длиной 1000 мм, выполненного из органического стекла толщиной 15 мм (рис. 1). В качестве горючего использовалась пропано-воздушная смесь, состав которой контролировался интерферометром Релея. Электрическое поле прикладывалось к металлическим обкладкам размерами 850×60 мм, расположенным снаружи на боковых противоположных сторонах с отступлением от концов канала на 75 мм. В стенки канала вмонтированы фотодиоды, с помощью которых фиксировалось время прохождения фронта пламени между электродами. Для защиты от электрических помех канал с электродами заключался в сетчатый металлический экран.

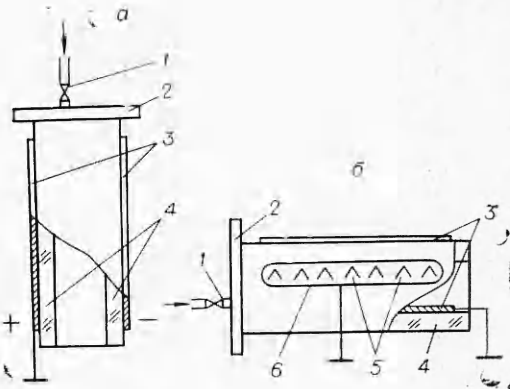
Канал заполнялся смесью определенное время, после чего с помощью дежурного факела смесь поджигалась у нижнего открытого конца канала. Пламя имело характерную менископодобную форму; в электрическом поле вершина пламени располагалась ближе к катоду, а само пламя имело более вытянутую форму. Распространение пламени происходило равномерно, для исключения вибрационного режима в закрывающем фланце канала делались демпфирующие отверстия.

По мере сгорания смеси у открытого конца канала формировалась струя продуктов сгорания, которая затем конвективным потоком спускалась вверх, омывая канал и электроды. В случае богатых смесей осуществлялось неполное сгорание, и у нижнего конца канала происходило догорание смеси, что создавало утечку тока между электродами, а в некоторых случаях и пробой.

На рис. 2 представлены осциллограммы тока во внешней цепи при распределении пламени в вертикальном канале между изолированными электродами. На осциллограммах 2, а, б зарегистрированы сигналы фотодиодов (верхняя кривая) и ток смещения при напряжении между электродами 15 кВ. Видно, что ток смещения существует в течение всего времени распространения пламени в электрическом поле. Осциллограмма 2, а получена при первом прохождении пламени через канал, 2, б — при повторном, производимом после заполнения канала горючей смесью без снятия напряжения. Сравнение двух осциллограмм показывает, что ток во втором случае меньше и имеет спадающий характер. Разница объясняется тем, что при первом прохождении пламени в результате разделения зарядов и оседания их на стенках в канале образуется остаточное элек-

Рис. 1. Канал с внешними электродами (а) и с внутренним электродом (б) для исследования распространяющихся пламен.

1 — ввод горячей смеси; 2 — фланец; 3 — электроды; 4 — боковая стенка; 5 — электроскопы; 6 — экран.



трическое поле, встречное с приложенным, и последующее распространение пламени проходит практически в отсутствие напряженности в канале.

Наличие остаточного поля наглядно подтверждает сравнение осциллограмм, полученных при распространении пламени во внешнем электрическом поле (см. рис. 2, в, д) и при последующем распространении в остаточном поле с закороченной внешней цепью (см. рис. 2, г, е). Как явствует из осциллограмм, ток в остаточном поле имеет величину, не отличающуюся по порядку величины от тока во внешнем поле, но противоположен по знаку.

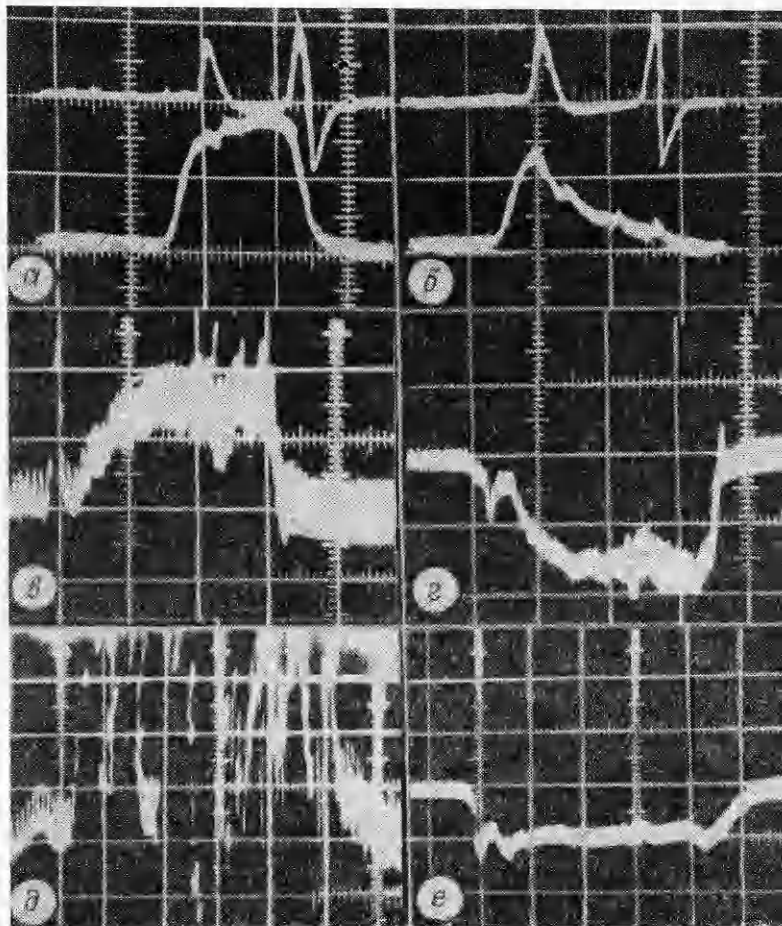


Рис. 2. Осциллограммы токов смещения во внешней цепи при распространении пламени в электрическом поле.

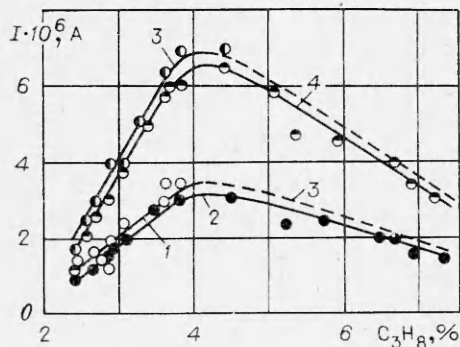


Рис. 3. Зависимость величины тока смещения от состава смеси.

1 — внешнее поле 10 кВ; 2 — остаточное поле (10 кВ); 3 — внешнее поле 15 кВ; 4 — остаточное поле (15 кВ).

На осциллограмме 2, *д* наблюдаются значительные пульсации, характерные при распространении богатых смесей. Объясняется это тем, что часть зоны догорания в этих случаях располагается вне канала и создает дополнительную утечку тока, нарушая полную изоляцию электродов.

На рис. 3 представлены зависимости величины токов смещения от состава горючей смеси при напряжениях поля 10 и 15 кВ, а также в остаточном поле. Из графика видно, что характер зависимости одинаков как для внешнего, так и для остаточного поля. Ток максимален для составов, близких к стехиометрии, что связано, видимо, с большей скоростью их распространения. Штриховые кривые проведены предположительно, поскольку обработка данных затруднялась из-за пульсаций.

Наличие остаточного поля также наглядно подтверждается следующим экспериментом. Внутри канала, расположенного горизонтально, к одной из боковых стенок приклеивалась тонкая металлическая фольга, образующая внутренний электрод (см. рис. 1, *б*). Электрическое поле в канале создавалось между внутренним заземляющимся электродом и расположенным на противоположной стенке внешним электродом. Вдоль одной из стенок канала, не занятой электродами, располагались тонкие электрические зонды, вплавленные в стенку и выступающие внутрь канала на 15 мм. На наружные концы зондов прикреплялись пары лепестков из тонкой фольги, и вся эта система простейших электроскопов экранировалась. В момент включения электрического поля лепестки раздвигались; по мере прохождения фронта пламени через канал лепестки поочередно спадали, указывая на полное отсутствие поля внутри канала. Если далее внешнее поле уменьшалось до нуля, то лепестки вновь раздвигались почти до первоначального положения и могли находиться так затем продолжительное (до нескольких часов) время.

Проведенные эксперименты по влиянию электрического поля на вибрационный режим горения также показали, что как с внешним полем, так и с остаточным, наблюдается одинаковый эффект влияния на вибрационный режим горения в канале. Если во внешнем электрическом поле происходит подавление либо усиление вибрационного режима, то такое же подавление либо усиление происходит и в остаточном электрическом поле. Наоборот, если прохождение пламени через поле сопровождалось каким-либо эффектом влияния на вибрационный режим, то при последующем прохождении в результате нейтрализации внешнего поля остаточным этот эффект полностью исчезает, как если бы поле к электродам не было приложено.

Стационарное пламя. Объектом исследования служило бунзеновское пламя, размещенное между двумя изолирующими стеклянными пластинами размерами $3 \times 260 \times 460$ мм, поставленными вертикально (рис. 4). С внешней стороны, вплотную к пластинам размещались плоские электроды, расстояние между ними составляло 70 мм. Горелка состояла из стеклянной трубки с внутренним диаметром 4 мм и размещалась посередине между изолирующими пластинами. Ток измерялся с помощью двух зондов и чувствительного микроамперметра. Зонды делались из нержавеющей стали в виде проволоки диаметром 0,5 мм и помещались в керамическую трубку на расстоянии 15 мм друг от друга. Зондовая часть

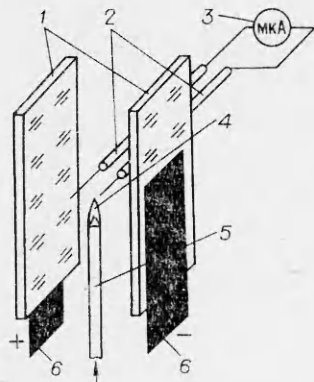


Рис. 4. Зондирование стабилизированного пламени в электрическом поле.

1 — изоляционные пластины; 2 — зонды; 3 — микроамперметр; 4 — пламя; 5 — горелка; 6 — электроды.

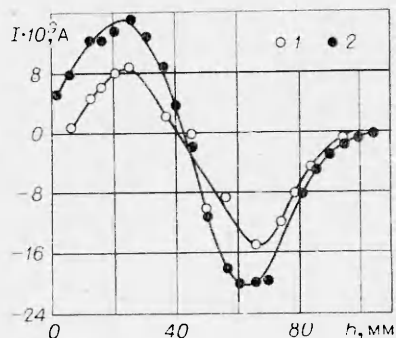


Рис. 5. Изменение тока зондов от расстояния между устьем горелки и сечением зондирования (h).

выступала на 10 мм. Зонды располагались горизонтально по обе стороны от пламени и могли перемещаться по высоте для регистрации тока в разных сечениях факела.

На рис. 5 представлена зависимость тока через зонды от высоты h при напряжениях между изолированными электродами 12 (1) и 16 кВ (2). За начало отсчета принято устье горелки. Из графика видно, что при увеличении высоты ток вначале растет, а затем убывает и достигает нуля. При дальнейшем увеличении высоты ток меняет знак и вновь достигает максимума при $h \approx 65$ мм, а затем убывает до нуля. Такое поведение графика говорит о том, что в межэлектродном пространстве в электрическом поле происходит движение заряженных частиц (ионов и электронов), приводящее к разделению зарядов. На это движение заряженных частиц по горизонтали накладывается также движение, обусловленное конвективным сносом вверх, где над электродами внешнее электрическое поле быстро спадает и разноименно заряженные частицы рекомбинируют.

На основании такой схемы можно предположить, что ток, протекающий в межэлектродном пространстве, а следовательно, и влияние электрического поля на горение будет зависеть от расстояния между зонами горения и рекомбинации. Наглядным подтверждением этого вывода является приведенный на рис. 6 фрагмент интерференционного фильма стационар-

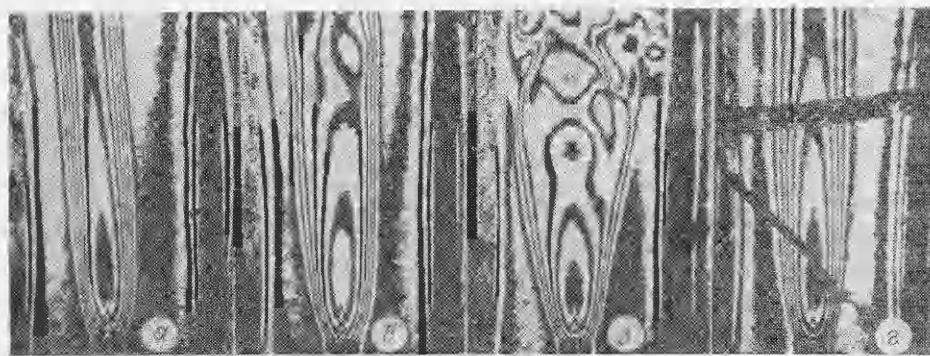


Рис. 6. Интерференционные картины истечения продуктов сгорания.

а) без электрического поля, б) $U=16$ кВ, $h=30$ мм; в) $U=16$ кВ, $h=40$ мм; г) $U=16$ кВ, $h=200$ мм.

ного пламени, помещенного между изолированными плавно поднимающимися электродами. На рисунках анод расположен с правой стороны, катод — с левой. В начале эксперимента верхний конец электродов располагался в 30 мм ниже устья горелки (первый и второй кадры). В последующем электроды плавно поднимались. Видно, что с подъемом электродов угол раскрытия струи продуктов сгорания вначале увеличивается, а затем уменьшается. Наибольший эффект поля наблюдался при расположении верхней границы электродов выше устья горелки на 40—60 мм.

В заключение авторы выражают благодарность Н. И. Кидину за обсуждение результатов экспериментов.

*Поступила в редакцию
8/IV 1980*

ЛИТЕРАТУРА

1. Дж. Лаутон, Ф. Вайнберг. Электрические аспекты горения. М., Энергия, 1976.
2. Е. М. Степанов, Б. Г. Дьячков. Ионизация в пламени и электрическое поле. М., Металлургия, 1968.
3. Н. И. Кидин. Канд. дис. МФТИ, 1975.
4. Н. И. Кидин, В. Б. Либрович.— В сб.: Физика горения и методы ее исследования. Под ред. Аbruкова С. А. Чебоксары, 1976.
5. Г. Д. Саламандра.— В кн.: Теплофизические свойства и газодинамика высокотемпературных сред. М., Наука, 1972.
6. Н. А. Медведев, В. В. Афанасьев, С. А. Аbruков.— В сб.: Физика горения и методы ее исследования. Вып. 6. Чебоксары, 1976.
7. Б. С. Скалов, А. С. Соколик. ЖФХ, 1934, V, 5.

ВЛИЯНИЕ СОСТАВА РЕАГИРУЮЩЕЙ СМЕСИ НА ОБЛАСТЬ СУЩЕСТВОВАНИЯ ХОЛОДНЫХ ПЛАМЕН ПРИ ОКИСЛЕНИИ ПРОПИЛЕНА

Р. Р. Григорян, С. Д. Арсентьев, А. А. Мангалян

(Ереван)

Явление холодных пламен, наблюдаемое при окислении углеводородов, продолжает оставаться предметом подробных исследований, что обусловлено теоретической и практической важностью проблемы окисления и горения углеводородных газов. В холодных пламенах пропана [1—3] и бутанов [4, 5] удалось обнаружить радикалы и проследить за их кинетическим поведением. Полученные результаты доказывают цепную природу явления и проливают свет на механизм возникновения и затухания холодных пламен. Наряду с этим, однако, далеко не во всех случаях установлены области возникновения холодных пламен в координатах $p-T$ в различных углеводородных системах. Не изучено также влияние различных параметров на процесс холоднопламенного окисления.

Результаты ранних работ, посвященных этому вопросу, обобщены в монографии [6]. Согласно этим данным области возникновения холодных пламен в координатах $p-T$ зависят от состояния стенок реактора, его диаметра и соотношения углеводорода и кислорода. Например, согласно данным по окислению парафиновых углеводородов, обеднение смеси углеводородом снижает интенсивность холодных пламен и сдвигает границу области самовоспламенения в сторону высоких давлений. Также установлено, что при холоднопламенном окислении парафиновых углеводородов