

04;09;11

Параметры пламени, возникающего при воспламенении тонких пленок спирта с помощью поверхностного СВЧ-разряда

© В.М. Шибков, Л.В. Шибкова

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
119991 Москва, Россия

(Поступило в Редакцию 24 декабря 2008 г. В окончательной редакции 20 мая 2009 г.)

В условиях поверхностного СВЧ-разряда, создаваемого в неподвижном воздухе при атмосферном давлении, реализовано быстрое нетепловое плазменно-стимулированное воспламенение тонких пленок спирта. Проведено исследование основных параметров и свойств пламени, возникающего в процессе воспламенения и горения спирта. Показано, что воспламенение происходит при температуре газа вблизи поверхности антенны, не превышающей 1000 К, в процессе воспламенения в условиях больших значений приведенного электрического поля температура пламени около антенны достигает 3300 К, а концентрация электронов — $2 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-3}$. Температура электронов в пламени при горении спирта изменяется от 0.8 eV на расстоянии $y = 10 \text{ mm}$ от поверхности антенны до 0.3 eV при $y = 40 \text{ mm}$.

Введение

В научной литературе уже в течение нескольких десятилетий обсуждается вопрос о поиске возможных способов эффективного управления процессами горения газообразных и жидких углеводородов с помощью различных физических воздействий. Эта проблема является очень актуальной с точки зрения новой области физики, а именно сверхзвуковой плазменной аэродинамики, где одним из главных направлений является задача максимального сокращения периода индукции, что возможно осуществить с помощью газоразрядной плазмы, которая интенсифицирует разветвленно-цепные реакции при воспламенении высокоскоростных горючих потоков. Изучение процесса воспламенения и горения углеводородных смесей в условиях низкотемпературной плазмы важно как с точки зрения фундаментальных исследований механизмов и кинетики атомно-молекулярных превращений при наличии сильных электрических полей, так и с точки зрения оптимизации ряда прикладных задач. Одной из таких проблем является разработка физических принципов горения высокоскоростных горючих потоков в условиях прямоточного воздушно-реактивного двигателя. В этих условиях требуется обеспечить быстрое объемное воспламенение углеводородного топлива, для чего необходимо максимально сократить время иницирования воспламенения.

В нашей лаборатории для воспламенения высокоскоростных воздушно-углеводородных потоков используются различные электродные и безэлектродные разряды, в том числе и поверхностный сверхвысокочастотный разряд, существующий при высоких значениях приведенного электрического поля $E/n = 100\text{--}500 \text{ Td}$ [1–10]. Это обстоятельство очень важно с точки зрения быстрого нагрева газа, эффективной наработки активных частиц и радикалов, а также создания плазмы с высокой степенью ионизации. Все эти факторы являются определяющими для быстрого воспламенения углеводородных смесей [11–15]. Проведенные ранее эксперименты показали,

что период индукции при воспламенении с помощью самостоятельного поверхностного СВЧ-разряда сверхзвукового пропан-воздушного потока, а также жидких углеводородных пленок в условиях высокоскоростного потока воздуха может достигать $10 \mu\text{s}$ [8–10]. Для понимания физико-химических процессов, происходящих при столь быстром плазменно-стимулированном воспламенении жидких углеводородных пленок в условиях высокоскоростного воздушного потока, вначале необходимо было изучить динамику их воспламенения в неподвижном воздухе. В [16] приведено описание экспериментальной установки и используемых методов диагностики. Определены время задержки воспламенения тонкой пленки спирта и скорость распространения передней границы области интенсивного плазменно-стимулированного горения в условиях поверхностного СВЧ-разряда. Показано, что в зависимости от подводимой мощности период индукции изменяется от 10 до $100 \mu\text{s}$, плазменно-стимулированное воспламенение происходит на антенне в области существования поверхностного СВЧ-разряда, скорость распространения передней границы области интенсивного горения около антенны достигает 300–350 м/с.

Настоящая статья, являющаяся естественным продолжением работы [16], посвящена изучению основных параметров пламени, возникающего при воспламенении тонкой пленки спирта с помощью самостоятельного поверхностного СВЧ-разряда, что важно для оптимизации условий применения сверхвысокочастотного разряда в сверхзвуковой плазменной аэродинамике.

Экспериментальная установка и методы диагностики

Поверхностный СВЧ-разряд [1–10], используемый для воспламенения тонких жидких углеводородных пленок, создавался на кварцевой антенне прямоугольного сечения $9.5 \times 19 \text{ mm}$ и длиной 115 mm. Источником СВЧ-

излучения служил импульсный магнетронный генератор с длиной волны $\lambda = 2.4$ см. Длительность СВЧ-импульсов τ можно было изменять от 5 до 100 μ s. Отдаваемая в тракт импульсная СВЧ-мощность $W < 75$ kW. В экспериментах в качестве модельного углеводорода использовался спирт. Тонкая пленка спирта наносилась кисточкой на широкую стенку вертикально расположенной кварцевой антенны, на поверхности которой создавался СВЧ-разряд. Эксперименты проводились при атмосферном давлении воздуха. Диагностический комплекс, используемый для исследования процесса воспламенения спирта, включает в себя следующее оборудование: оптические рефракционные датчики, фотоэлектронные умножители, импульсная теневая установка, термопары, система для измерения проводимости пламени, электрические зонды, двухпроводная линия, монохроматоры и спектрографы, цифровые осциллографы, фото- и кинокамеры, кварцевые световоды, линзы, зеркала. В [16] приведено подробное описание методов, используемых для исследования динамики воспламенения тонких пленок спирта. В настоящей работе для определения параметров пламени использовались методы, применяемые для измерения температуры пламени, а также температуры электронов и концентрации заряженных частиц.

Температура газа определялась спектроскопическим методом, основанным на регистрации распределения интенсивности линий вращательной структуры молекулярных полос. В воздухе при средних давлениях для определения температуры газа использовалась полоса (0;2) с длиной волны канта $\lambda = 380.5$ nm второй положительной системы азота. В пламени, а также в разряде в воздухе при высоких давлениях, когда интенсивность полосы (0;2) второй положительной системы азота недостаточна для измерения T_g , температура определялась по относительной интенсивности полос циана (полосы (0;0), длина волны канта $\lambda = 388.3$ nm и (1;1), $\lambda = 387.1$ nm), а также полос системы Свана молекулярного углерода (полосы (0;0) $\lambda = 516.52$ nm, (1;1) $\lambda = 512.93$ nm и (2;2) $\lambda = 509.77$ nm).

Для измерения температуры пламени, возникающего при воспламенении тонкой пленки спирта с помощью поверхностного СВЧ-разряда, проводилась регистрация спектра излучения исследуемого объекта с использованием двухканального спектрографа AvaSpec-2048-2-DT, а также монохроматоров ДФС-12 и МДР-23 (обратная линейная дисперсия 0.5 и 1.3 nm/mm). Излучение из определенного поперечного сечения исследуемого светящегося объекта при помощи системы линз и зеркал проецировалось на входные щели спектральных приборов. Перемещая систему линз и зеркал, можно было регистрировать пространственно-временное распределение интенсивности излучения различных молекулярных полос и соответственно получать пространственное распределение температуры газа.

Регистрация факта воспламенения жидких углеводородных пленок и оценка степени ионизации газа проводились при измерении проводимости пламени. Измерение степени ионизации пламени основано на методе

определения концентрации электронов в распадающейся плазме, предложенном в [17]. В этом случае на электроды разрядной трубки наряду с основным электрическим импульсом, поджигающим разряд, подается второй импульс напряжения с малой амплитудой и длительностью. Усредненное по объему значение электронной концентрации \bar{n}_e связано с силой тока i в зондирующем импульсе формулой: $i = \bar{n}_e e \bar{v}_{dr} S$, где e — заряд электрона, \bar{v}_{dr} — дрейфовая скорость электронов, S — площадь поперечного сечения разрядной трубки.

Экспериментально измеряется напряженность электрического поля E и сила тока i в зондирующем импульсе при различных задержках его относительно заднего фронта основного импульса, создающего плазму. Зная величину E и используя хорошо известную [18] зависимость $\bar{v}_{dr} = f(E/p)$, можно найти скорость дрейфа \bar{v}_{dr} , а по формуле $\bar{n}_e = i/(e\bar{v}_{dr}S)$ и значение \bar{n}_e .

Данная диагностика широко применяется в научных исследованиях, например, в [19] этот метод использовался для измерения временного хода концентрации электронов в распадающейся плазме смеси инертных газов. Следует отметить, что амплитуда зондирующего импульса должна выбираться настолько малой, чтобы не вызывать дополнительной ионизации газа. Для проверки отсутствия дополнительной ионизации на разрядную трубку подается второй зондирующий импульс, следующий сразу же за первым импульсом, и регистрируется ток i_2 во втором импульсе. Если сила тока i_2 не зависит от того, прикладывается ли к разрядной трубке первый зондирующий импульс или нет, это указывает на отсутствие во время действия первого зондирующего импульса дополнительной ионизации газа.

В случае использования поверхностного СВЧ-разряда для инициирования воспламенения тонких жидких углеводородных пленок пламя, возникающее на антенне, распространяется с большой скоростью в перпендикулярном направлении антенны [16]. На пути распространения пламени помещался плоский измерительный конденсатор, местоположение которого изменялось от 10 до 50 mm от поверхности антенны. В экспериментах измерялась временная задержка между моментом включения импульсного СВЧ-разряда, который инициировал воспламенение жидких углеводородов у поверхности антенны, и моментом появления электрического сигнала на измерительном сопротивлении R , включенном в цепь, состоящую из источника питания и плоского конденсатора. По этим измерениям определялся факт воспламенения, минимальная длительность СВЧ-импульса, необходимая для воспламенения жидких углеводородных пленок, а также скорость распространения пламени в перпендикулярном направлении антенны.

Величина тока i , протекающего через сопротивление R , когда в пространство между пластинами конденсатора попадало пламя, позволяла оценить степень ионизации газа в нем. В экспериментальных условиях конденсатор имел следующие размеры: расстояние между

пластинами $d = 1$ см, площадь пластин $S = 1 \times 2$ см. Разность потенциалов между пластинами конденсатора $U_0 = 20$ В. При этом средняя электронная концентрация \bar{n}_e [см⁻³] в эксперименте определялась по формуле: $\bar{n}_e = 1.1 \cdot 10^{11} i$, где i — ток [мА], протекающий через конденсатор. Несмотря на то что точность определения электронной плотности с помощью этого метода недостаточно высока, этот метод является надежным и простым способом исследования процесса воспламенения и горения углеводородного топлива.

Концентрация заряженных частиц в пламени при горении жидких углеводородов в условиях поверхностного СВЧ-разряда измерялась также с помощью двойного зонда. Температура пламени в этих условиях достигает 3000–3300 К. При такой высокой температуре газа концентрация отрицательных ионов в пламени пренебрежимо мала по сравнению с концентрацией положительных ионов, поэтому концентрация электронов n_e равна концентрации положительных ионов n_i^+ , к тому же плотность нейтральных частиц соответствует приведенному давлению газа $7 \cdot 10^3$ Па. В этих условиях для оценки плотности зарядов по измеренной величине ионного тока насыщения в плотном ионизованном газе применялась формула, приведенная в [18]. В эксперименте использовались симметричные зонды диаметром 1 мм, длиной рабочей части 10 мм и расстоянием между центрами 5 мм. Измерения концентрации ионов проводились по ионному току насыщения, для этого между зондами подавалось постоянное смещение 36 В. Последовательно с источником питания включалось измерительное сопротивление. Сигнал с измерительного сопротивления, пропорциональный зондovому току, подавался на вход цифрового запоминающего осциллографа TDS-2014. Запуск осциллографа был синхронизован с импульсом СВЧ-разряда, поэтому измерения проводились не только с пространственным, но и временным разрешением.

Для измерения ВАХ двойного зонда в условиях горения жидких углеводородов вместо постоянного смещения включался генератор синусоидального напряжения. Амплитуда синусоидального напряжения $U = \pm 30$ В была выбрана исходя из достижения на ВАХ ионного тока насыщения. В эксперименте период T синусоидального напряжения мог изменяться от 10 мкс до 1 мс. Поскольку концентрация в течение импульса длительностью $\tau = 100$ мкс изменяется, поэтому желательно проведение измерений с длительностью много меньшей τ . В то же время, уменьшение T приводит к нарастанию паразитного тока смещения. С целью уменьшения этих наводок измерительное сопротивление располагалось непосредственно за зондом. Сигнал с этого сопротивления по экранированному кабелю с заземленным экраном поступал на один из каналов осциллографа TDS-2014 (аналогичным образом на двойной зонд подавалось напряжение смещения от генератора синусоидального напряжения).

Концентрация электронов в различных областях пространства вблизи поверхности антенны, где происходит воспламенение жидких углеводородных пленок, и

на различных расстояниях от нее определялась также при измерении поглощения диагностического СВЧ-излучения миллиметрового диапазона. Для этого использовался милливаттный СВЧ-генератор с перестраиваемой длиной волны в диапазоне $\lambda = 4$ –8 мм, двухпроводная линия и кристаллический СВЧ-детектор, регистрируемый уровень прошедшего через двухпроводную линию сигнала. Использование двухпроводной линии позволяло проводить измерения с достаточно хорошим (порядка 2–3 мм) пространственным разрешением в плазменном объекте размером несколько сантиметров. Так как мощность зондирующего СВЧ-излучения не превышала 100 мВт, то оно не оказывало существенного влияния на параметры исследуемого объекта. При этом имелась возможность оценить концентрацию электронов с помощью измерения степени поглощения зондирующего излучения при его прохождении через плазменный объект.

Обычно для измерения степени поглощения микроволнового излучения в плазменных образованиях большого размера, существенно превышающего длину волны зондирующего излучения, диагностирующее излучение фокусируется с помощью различных антенн. Однако в нашем случае, когда плазменное образование имеет сантиметровые размеры, для улучшения пространственного разрешения использовалась специально разработанная для этих целей двухпроводная линия.

Блок-схема установки представлена на рис. 1. Она состоит из задающего микроволнового генератора 1, имеющего волноводный выход 2. Волноводная секция, снабженная специальным согласующим каскадом, переходит в двухпроводную линию 3. Двухпроводная линия через согласующий каскад соединялась с секцией кристаллического детектора 5. С выхода кристаллического детектора сигнал поступал на цифровой осциллограф 6. В эксперименте двухпроводная линия могла перемещаться в пространстве, что позволяло проводить измерения на различных расстояниях от поверхности антенны. Следует отметить, что величина поглощения зондирующего микроволнового излучения пропорциональна не концентрации электронов n_e , а величине $n_e L$, равной произведению концентрации электронов n_e на размер L плазменного образования. При этом для локальных измерений необходимо знать закон изменения концентрации электронов в пространстве.

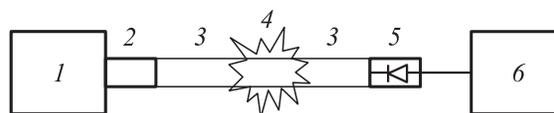


Рис. 1. Блок-схема экспериментальной установки для измерения поглощения зондирующего СВЧ-излучения в области горения спирта в условиях поверхностного СВЧ-разряда: 1 — маломощный перестраиваемый СВЧ-генератор; 2 — волновод; 3 — двухпроводная линия; 4 — исследуемый плазменный объект; 5 — кристаллический детектор; 6 — цифровой осциллограф.

При отсутствии пламени в зонде двухпроводной линии на осциллографе регистрировался сигнал с кристаллического детектора амплитудой 140 мВ. При помощи ионизованной области в зону двухпроводной линии сигнал с кристаллического детектора уменьшался. При этом полная отсечка (отсутствие сигнала на выходе кристаллического детектора) соответствует величине $(n_e L)_{\text{cut off}} \sim 10^{13} \text{ cm}^{-3}$. При малых поглощениях концентрация электронов прямо пропорциональна величине поглощения.

Экспериментальные результаты

На рис. 2 представлена интегральная фотография общего вида горения тонкой пленки спирта, инициируемого с помощью импульсного поверхностного СВЧ-разряда. Спирт нанесен тонким слоем на левую поверхность вертикально расположенной кварцевой антенны, и некоторое количество спирта, стекающего вниз по антенне, имеется в расположенном на металлическом фланце углублении в зоне подвода СВЧ-энергии к диэлектрической антенне. Как показано в [16], интенсивное белое свечение внизу слева от антенны представляет собой плазменно-стимулированное воспламенение и горение тонкой пленки спирта при наличии сильного приведенного электрического поля.

При импульсном включении СВЧ-мощности происходят поглощение в тонкой пленке спирта подводимой энергии, быстрый нагрев жидкого спирта до температуры кипения 351 К и его перевод в парообразное состояние. В этом случае идет также сильное дробление жидкой пленки на мелкие капли, инжектируемые в окружающее антенну пространство, что представляет собой новый способ плазменного инжектора, когда жидкость в СВЧ-разряде дробится на мелкодисперсную суспензию.

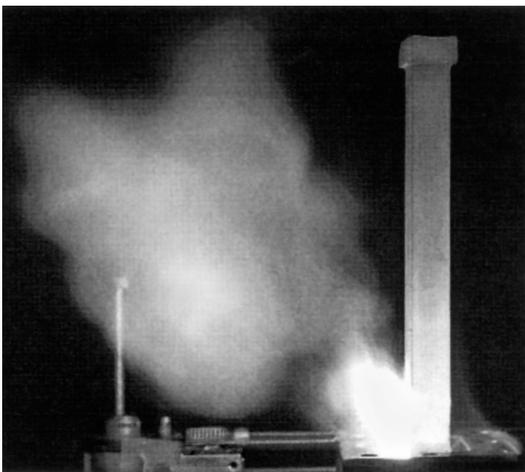


Рис. 2. Интегральная фотография (вид сбоку) процесса воспламенения и горения чистого спирта в условиях поверхностного СВЧ-разряда при давлении воздуха $76 \cdot 10^3 \text{ Pa}$, длительности СВЧ-импульса $100 \mu\text{s}$, импульсной СВЧ-мощности 55 kW . Время экспозиции кадра 2 с.

В данных условиях (подводимая к антенне импульсная СВЧ-мощность 55 kW) процесс воспламенения спирта начинается спустя $20 \mu\text{s}$ после включения СВЧ-энергии и происходит в условиях больших значений приведенного электрического поля.

Из-за гидро- и газодинамических эффектов, происходящих в условиях импульсного самостоятельного поверхностного СВЧ-разряда, воздух вблизи антенны приходит в движение со скоростью порядка 10^4 cm/s . Быстрое движение газа проявляется на интегральной фотографии рис. 2 в виде треков движущихся мелких (микронного масштаба) капелек спирта и его паров. Возможность наблюдения на интегральной фотографии несветящихся движущихся объектов обеспечивается их подсветкой интенсивным импульсным излучением, возникающим при воспламенении и горении спирта. Спустя несколько миллисекунд после того как плазменно-стимулированное горение спирта вблизи антенны в условиях поверхностного СВЧ-разряда заканчивается, происходит автовоспламенение мелкодисперсной суспензии спирта и его паров, что проявляется на интегральной фотографии в виде компактного светящегося объекта слева от антенны. Интенсивность свечения этого ионизованного образования много меньше по сравнению с интенсивностью свечения из области плазменно-стимулированного горения спирта, инициируемого поверхностным СВЧ-разрядом. Слабое синеватое свечение, наблюдаемое справа от антенны, — это обычное нормальное стационарное горение спирта, находящегося на фланце и воспламененного СВЧ-разрядом. Этот процесс продолжается стационарно, пока не выгорит весь спирт.

При нанесении на поверхность антенны большего количества спирта плазменно-стимулированное горение, которое инициируется поверхностным СВЧ-разрядом, существующим на поверхности антенны в области с координатами $z = 0-30 \text{ mm}$ (z — продольная координата — расстояние вдоль антенны, отсчитываемое от конца подводимого СВЧ-мощности к кварцевой антенне металлического волновода), может сопровождаться с некоторой временной задержкой $t = 10-30 \text{ ms}$ относительно заднего фронта СВЧ-импульса воспламенением и последующим сгоранием тонкой пленки спирта на всей поверхности антенны. При этом снизу вверх вдоль антенны распространяется медленная волна горения.

На рис. 3 представлена фотография этого процесса, полученная со временем экспозиции 1 с. За это время фронт горения успевает распространиться вдоль всей длины антенны, поэтому на интегральной фотографии это проявляется в виде ярко светящейся полосы (см. рис. 3). Видно, что максимальная интенсивность свечения наблюдается не на антенне, а на расстоянии $y = 1-2 \text{ mm}$ от ее поверхности (y — поперечная координата — расстояние от поверхности антенны). Данный процесс фиксировался также с помощью цифровой видеокамеры. Последующая покадровая обработка видеополосы позволила разрешить во времени исследуемый

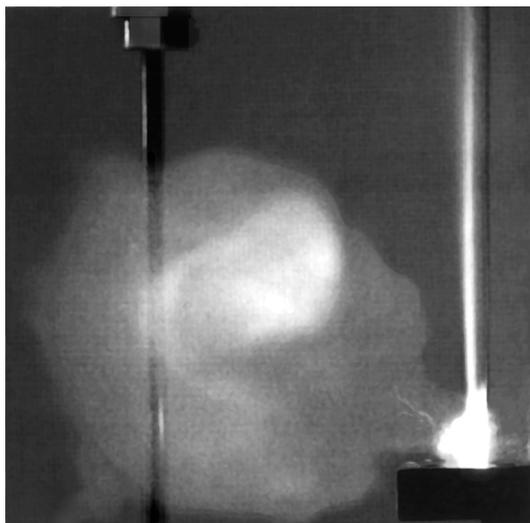


Рис. 3. Интегральная фотография (вид сбоку) процесса сгорания тонкой пленки спирта при распространении вдоль поверхности антенны медленной волны горения, инициируемой поверхностным СВЧ-разрядом при $p = 0.1$ МПа, $\tau = 100 \mu\text{s}$, $W = 55$ kW. Время экспозиции кадра 1 с.

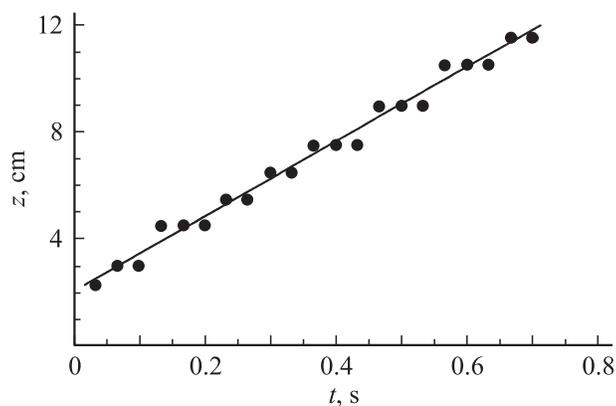


Рис. 4. Временная зависимость положения переднего фронта нормального горения тонкой пленки спирта вдоль поверхности антенны.

процесс и получить зависимость положения переднего фронта горения тонкой пленки спирта от времени (см. рис. 4). Видно, что волна горения распространяется вдоль антенны с почти постоянной скоростью ~ 15 см/с и в течение $t = 0.7$ с достигает конца антенны, что в тысячу раз меньше скорости распространения передней границы области интенсивного плазменно-стимулированного горения в условиях поверхностного СВЧ-разряда, существующего при больших значениях приведенного электрического поля.

Было проведено сравнение спектров излучения плазмы поверхностного СВЧ-разряда в воздухе при давлении $p = 0.1$ МПа и пламени, возникающем при плазменно-стимулированном горении спирта, инициируемом с помощью поверхностного СВЧ-разряда. Излучение в обоих случаях регистрировалось из областей пространства

с координатами $y = 1$ мм, $z = 10$ мм. Полученные спектры в области длин волн $\lambda = 400\text{--}700$ нм представлены на рис. 5. Видно, что спектр излучения при горении спирта намного интенсивней по сравнению со спектром разряда в воздухе без спирта. В данном спектральном интервале наблюдаются интенсивные молекулярные полосы, характерные для спектра горения углеводородов. Так, при горении спирта регистрируются полосы Свана молекулярного углерода и молекулярная полоса возбужденного радикала СН с длиной волны кванта 431.5 нм (полоса (0;0) перехода $A^2\Delta \rightarrow X^2\Pi$), которые вовсе не наблюдаются в спектре поверхностного СВЧ-разряда в воздухе. Интенсивность полос циана при плазменно-стимулированном воспламенении тонкой пленки спирта в три раза больше интенсивности полос циана, регистрируемых в плазме поверхностного СВЧ-разряда в воздухе. При горении спирта регистрируются также спектральные линии бальмеровской серии водорода H_α и H_β , интенсивность которых в тридцать раз превосходит их интенсивность из плазмы поверхностного СВЧ-разряда в воздухе.

На рис. 6 представлен временной ход температуры газа в активной фазе поверхностного СВЧ-разряда (длительность импульса $\tau = 100 \mu\text{s}$) в воздухе (кривая 1) и временной ход температуры пламени при горении спирта в сильном электрическом поле (кривая 2). Измерения проводились вблизи поверхности антенны $y = 1$ мм на расстоянии $z = 10$ мм от конца волновода, подводящего к кварцевой антенне микроволновую энергию. Импульсная мощность в обоих случаях равна 65 kW. Видно, что воспламенение спирта происходит через $15 \mu\text{s}$ после включения СВЧ-генератора, к этому времени воздух нагревается в условиях поверхностного СВЧ-разряда до температуры приблизительно 1000 К, а температура пламени при горении спирта в условиях сильного электрического поля равна 3300 К.

Были проведены также исследования интенсивности излучения пламени, возникающего при воспламене-

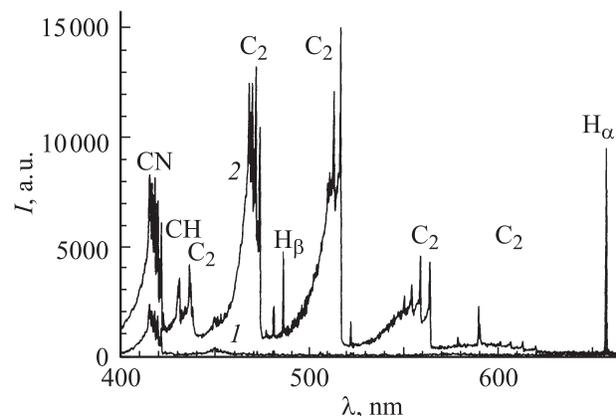


Рис. 5. Спектр плазмы поверхностного СВЧ-разряда в воздухе 1 и спектр излучения пламени при горении спирта 2 в условиях импульсно-периодического поверхностного СВЧ-разряда при $p = 0.1$ МПа, $y = 10$ мм, $\tau = 100 \mu\text{s}$, $f = 10$ Hz, $W = 55$ kW. Время экспозиции спектра $t = 500 \mu\text{s}$.

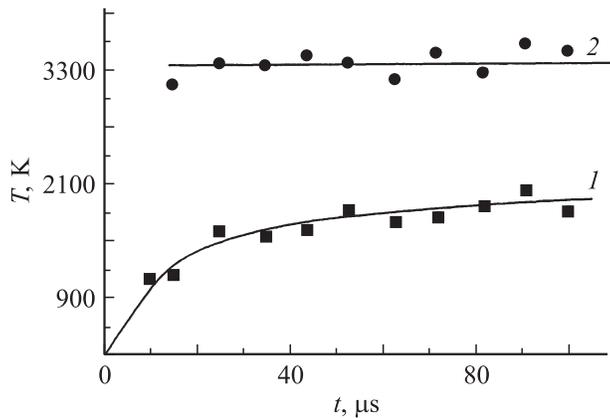


Рис. 6. Временной ход температуры газа в условиях поверхностного СВЧ-разряда в воздухе 1 и в пламени 2 при воспламенении спирта с помощью поверхностного СВЧ-разряда при $p = 0.1$ МПа, $\tau = 100 \mu\text{s}$, $W = 65$ Вт.

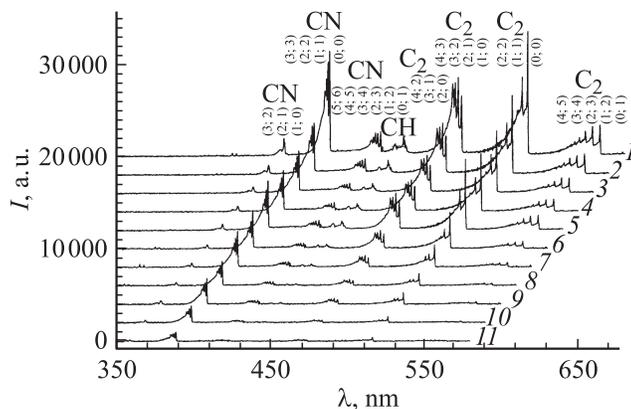


Рис. 7. Изменение со временем спектра пламени при горении спирта в воздухе в условиях импульсно-периодического поверхностного СВЧ-разряда. Давление воздуха $p = 0.1$ МПа, расстояние от поверхности антенны $y = 10$ мм, длительность импульсов $\tau = 100 \mu\text{s}$, частота следования импульсов $f = 10$ Гц, импульсная СВЧ-мощность $W = 55$ кВт, время экспозиции спектра $t = 500$ мс, временной интервал между спектрами $t = 1$ с.

нии спирта в условиях поверхностного СВЧ-разряда, в зависимости от нанесенного на поверхность антенны количества спирта. Для этого использовался импульсно-периодический режим создания поверхностного СВЧ-разряда с частотой следования импульсов $f = 10$ Гц. Спирт перед экспериментом однократно наносился на поверхность антенны. По мере его сгорания уменьшались как объем, занимаемый плазменно-стимулированным горением, так и интенсивность излучения пламени.

На рис. 7 представлено изменение со временем спектра пламени, зарегистрированного на расстоянии $y = 10$ мм от поверхности антенны. Видно, что по мере сгорания спирта интенсивность свечения полос Свана резко уменьшается, тогда как интенсивность

свечения полос циана остается на достаточно высоком уровне. Так, спустя 10 с после подачи первого СВЧ-импульса, т.е. после реализации 100 случаев плазменно-стимулированного воспламенения спирта, интенсивность свечения полос Свана уменьшается приблизительно в 100 раз, тогда как интенсивность полос CN только в 10 раз.

Определенное по данным, приведенным на рис. 7, изменение во времени температуры пламени в условиях импульсно-периодического СВЧ-разряда представлено на рис. 8. Видно, что по мере сгорания спирта температура пламени изменяется от 3300 К, что характерно для плазменно-стимулированного горения в условиях больших значений приведенного электрического поля, до приблизительно 2000 К. Эта температура характерна для поверхностного СВЧ-разряда в воздухе [1].

Для определения степени ионизации исследуемого образования применялись три методики, а именно метод двойного зонда, метод измерения проводимости с использованием плоского конденсатора и метод измерения степени поглощения зондирующего СВЧ-излучения.

Временной ход ионного тока насыщения двойного зонда, помещенного в область горения спирта, воспламененного с помощью поверхностного СВЧ-разряда, приведен на рис. 9. Аналогичная временная зависимость тока проводимости регистрируется при пролете через плоский конденсатор пламени, возникающего при горении спирта в условиях поверхностного СВЧ-разряда в воздухе. В отличие от зонда, позволяющего измерять локальную концентрацию в заданном месте пространства, плоский конденсатор из-за своих размеров (10×20 мм) дает возможность определять усредненную в пространстве концентрацию электронов. Оба этих метода показывают, что в фиксированную область пространства спустя определенное время, зависящее от расстояния до антенны и скорости распространения плазменного образования, приходит резкий фронт горения, которому соответствует достаточно высокая степень ионизации.

Определенная данными методами концентрация электронов на фронте горения представлена на рис. 10. Вид-

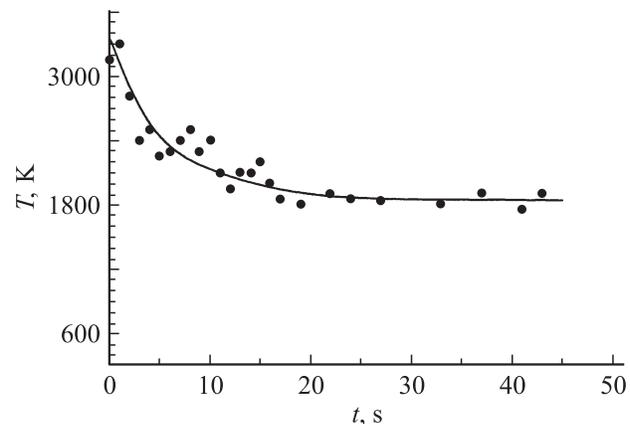


Рис. 8. Временной ход температуры пламени при горении спирта в воздухе в условиях импульсно-периодического поверхностного СВЧ-разряда.

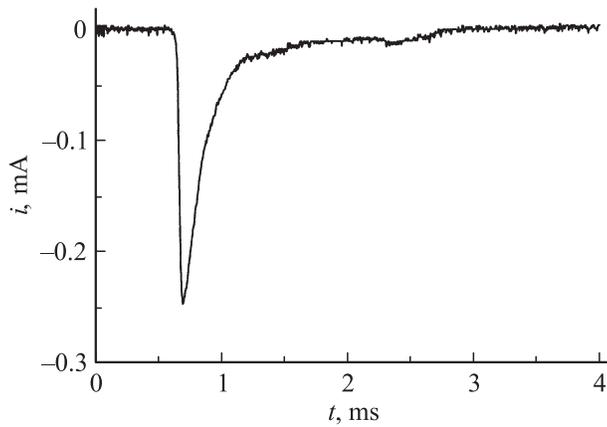


Рис. 9. Временной ход ионного тока насыщения двойного зонда в пламени при горении спирта в условиях поверхностного СВЧ-разряда в воздухе. $p = 0.1$ МПа, $\tau = 100 \mu\text{s}$, $W = 55$ кВт. Двойной зонд расположен на расстоянии $y = 20$ мм от поверхности антенны.

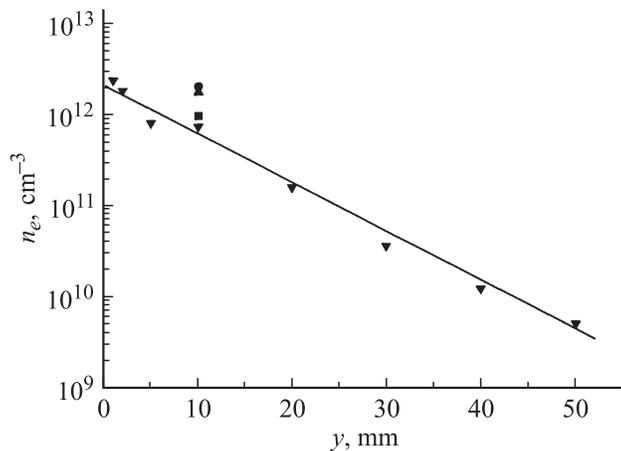


Рис. 10. Зависимость расстояния от поверхности антенны концентрация электронов на фронте горения в пламени, возникающем при воспламенении тонкой пленки спирта с помощью поверхностного СВЧ-разряда при $p = 76 \cdot 10^3$ Па, $W = 55$ кВт. \blacktriangledown — зондовые измерения при $\tau = 100 \mu\text{s}$; измерения по поглощению излучения 8 мм при τ , μs : \blacksquare — 35; \blacktriangle — 50; \bullet — 100.

но, что у поверхности антенны в зоне интенсивного горения концентрация электронов достигает $2 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-3}$, тогда как на расстоянии 50 мм от поверхности антенны концентрация электронов равна $5 \cdot 10^9 \text{ cm}^{-3}$.

Так как в наших условиях плотность нейтральных частиц соответствует приведенному давлению $7 \cdot 10^3$ Па, то температуру электронов в пламени при горении спирта можно было оценить по вольт-амперной характеристике (ВАХ) двойного зонда, который в экспериментах располагался в фиксированном месте пространства и мог перемещаться в пределах 10–40 мм от поверхности антенны. Помещать зонд вблизи поверхности антенны не имело смысла, так как на расстояниях $y < 10$ мм в области плазменно-стимулированного горения существует сильное электрическое поле, что приводит к

большим неконтролируемым искажениям ВАХ двойного зонда.

На рис. 11 представлен образец вольт-амперной характеристики, зафиксированный на расстоянии 25 мм от поверхности антенны. Так как в этом месте пространства объем пламени порядка 10 cm^3 и оно существует в течение 10–20 мс, то это позволило при регистрации ВАХ существенно снизить частоту синусоидального напряжения со 100 кГц, которая использовалась при регистрации временной зависимости вольт-амперной характеристики двойного зонда в течение СВЧ-импульса длительностью $\tau = 100 \mu\text{s}$ [5], до частоты 1 кГц. Это дало возможность, во-первых, увеличить отношение полезного сигнала к шуму, а во-вторых, существенно снизить влияние реактивных составляющих на вид ВАХ. В частности, практически полностью исчезает гистерезис (неполное совпадение вольт-амперных характеристик, фиксируемых при растущем и падающем синусоидальном напряжении смещения при частоте 100 кГц). Температура электронов оценивалась по формуле [20,21], применимой в общем случае, когда вольт-амперная характеристика двойного зонда несимметрична:

$$T_e = \frac{e}{k} \left(\frac{\Delta U}{\Delta i} \right)_{i=0} \frac{i_1 i_2}{i_1 + i_2},$$

где i_1 и i_2 — значения токов насыщения каждой из ветвей, а $\left(\frac{\Delta U}{\Delta i} \right)_{i=0}$ отражает наклон ВАХ в точке, где ток равен нулю. Естественно, что в этом выражении предполагается максвелловское распределение электронов по энергиям. Если функция распределения электронов по энергиям (ФРЭЭ) неравновесна, то это может привести к ошибкам в определении эффективной температуры электронов $T_{\text{эфф}} = \frac{2}{3} \bar{\epsilon}_e$ ($\bar{\epsilon}_e$ — средняя энергия электронов). Однако в пламени при горении спирта в отсутствие внешнего электрического поля отклонения ФРЭЭ от максвелловской невелики.

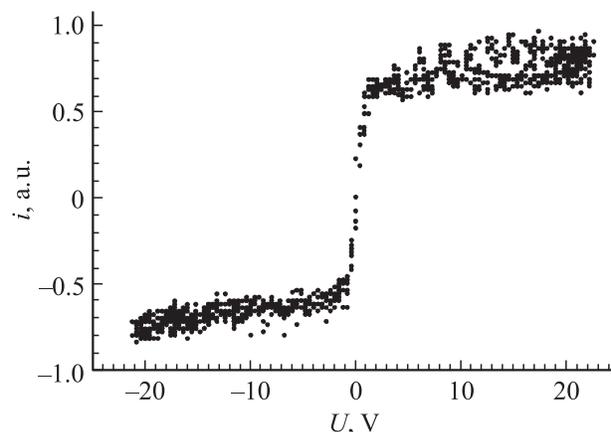


Рис. 11. Вольт-амперная характеристика двойного зонда, помещенного в область существования пламени, возникающего при воспламенении тонкой пленки спирта с помощью поверхностного СВЧ-разряда. Двойной зонд помещен на расстоянии $y = 25$ мм от поверхности антенны, давление воздуха $p = 0.1$ МПа, длительность СВЧ-импульса $\tau = 100 \mu\text{s}$, импульсная СВЧ-мощность $W = 55$ кВт.

Одновременно с зондовыми измерениями проводилась регистрация спектра излучения пламени из той же области пространства, где размещался двойной зонд. Получено, что на расстоянии $y < 10$ mm от поверхности антенны в области плазменно-стимулированного горения регистрируются континуум, интенсивность которого определяется тормозным и рекомбинационным излучением, а также интенсивные полосы циана [8]. Спектр излучения пламени в области сильных электрических полей у поверхности антенны сугубо неравновесный. Определенная на расстоянии $y = 2$ mm от поверхности антенны по непрерывному спектру температура электронов равна 7700 K, а температура газа, измеренная по молекулярным полосам циана и углерода, равна 3300 K. С увеличением расстояния от поверхности антенны вид спектра изменяется, интенсивность молекулярных полос резко падает, а непрерывный спектр соответствует тепловому планковскому излучению с температурой порядка 2500–3000 K [8].

Температура электронов на расстоянии $y = 25$ mm от поверхности антенны, определенная из представленной на рис. 11 вольт-амперной характеристики двойного зонда, равна 0.35 eV. Полученные значения температуры электронов лишь незначительно превышают измеренную спектроскопическим методом в этой области пространства температуру пламени 2500–3000 K. Это подтверждает наше предположение о том, что так как на расстояниях $y > 10$ mm от поверхности антенны электрическое поле отсутствует, то пламя близко к равновесному. Экспериментально найденные из ВАХ двойного зонда значения температуры электронов в пламени при горении спирта изменяются от 0.8 eV на расстоянии $y = 10$ mm до 0.3 eV при $y = 40$ mm, что достаточно хорошо соответствует результатам, полученным спектроскопическим методом.

Измерения степени поглощения зондирующего микроволнового излучения проводились в области интенсивного горения спирта, нанесенного тонким слоем на поверхность антенны. Воспламенение осуществлялось с помощью поверхностного СВЧ-разряда при импульсной мощности 55 kW и давлении окружающего воздуха $p = 76 \cdot 10^3$ Pa. Двухпроводная линия помещалась на расстоянии $y = 10$ mm от поверхности антенны. Длительность СВЧ-импульса изменялась от 5 до 200 μ s.

В условиях эксперимента при малой длительности СВЧ-импульса $\tau = 5$ –10 μ s воспламенение спирта не осуществлялось. При этом зондирующее излучение свободно (без поглощения) проходило через область измерения, хотя СВЧ-разряд на антенне формировался. Это подтверждает тот факт, что при высоких давлениях плазма поверхностного СВЧ-разряда локализована в тонком приповерхностном слое. С увеличением длительности СВЧ-импульса происходило воспламенение тонкой пленки спирта. При этом сигнал с кристаллического детектора уменьшался.

Полученные результаты при различной длительности СВЧ-импульса представлены на рис. 12. Видно, что с

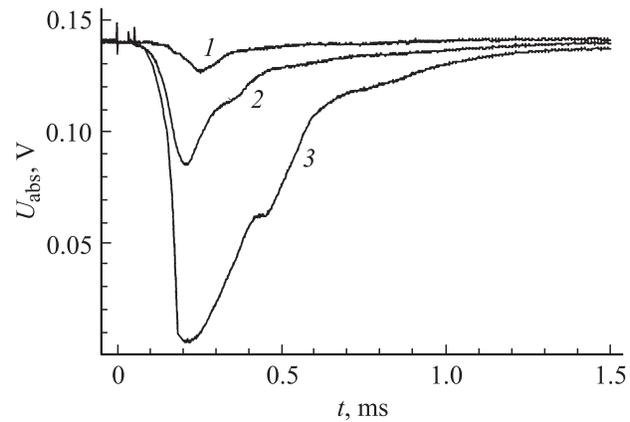


Рис. 12. Временной ход сигнала с кристаллического детектора при восплавлении тонкой пленки спирта с помощью поверхностного СВЧ-разряда ($p = 76 \cdot 10^3$ Pa, $W = 55$ kW, $y = 10$ mm, $z = 10$ mm) при длительности СВЧ-импульса τ , μ s: 1 — 35; 2 — 50; 3 — 100.

увеличением длительности СВЧ-импульса поглощение зондирующего излучения 8 mm увеличивается. Это связано с тем, что размеры области, занятой пламенем, растут с увеличением длительности воспламеняющего тонкий слой спирта СВЧ-импульса. При этом в условиях эксперимента максимальное поглощение наблюдается спустя 100–200 μ s после воспламенения спирта. По этим данным была оценена скорость распространения передней границы интенсивного горения спирта. В условиях эксперимента эта скорость достигает порядка 100 m/s, что подтверждает полученные ранее результаты о высокой скорости распространения передней границы интенсивного горения в условиях поверхностного СВЧ-разряда [16]. Концентрация электронов определялась с учетом размеров ионизованной области. Полученное этим методом значение концентрации электронов в пламени при горении спирта хорошо совпадает с определенным с помощью двойного зонда и плоского конденсатора (см. рис. 11).

Заключение

Проведенные исследования параметров пламени, возникающего при инициации воспламенения тонких пленок спирта поверхностным СВЧ-разрядом, показывают, что данный тип сверхвысокочастотного разряда является надежным и эффективным способом быстрого воспламенения жидкого углеводородного топлива и может найти практическое применение в сверх- и гиперзвуковой плазменной аэродинамике. Показано, что при горении жидких углеводородных пленок в условиях поверхностного СВЧ-разряда создается среда с высокой степенью ионизации газа. Вблизи антенны при больших значениях приведенного электрического поля воспламенение происходит в условиях, когда температура электронов существенно превышает температуру газа, т.е. в области плазменно-стимулированного горения ионизованная

среда является сугубо неравновесной, тогда как на больших расстояниях от поверхности антенны в зоне автовоспламенения, где электрическое поле отсутствует, пламя близко к равновесному.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 08-02-01251-а) и программы П-09 президиума РАН.

Список литературы

- [1] *Шибков В.М., Виноградов Д.А., Восканян А.В.* и др. // Вестн. Моск. унив. Сер. 3. Физика. Астрономия. 2000. Т. 41. № 6. С. 64.
- [2] *Шибков В.М., Александров А.Ф., Ершов А.П.* и др. // Вестн. Моск. унив. Сер. 3. Физика. Астрономия. 2004. № 5. С. 67.
- [3] *Шибков В.М., Ершов А.П., Черников В.А., Шибкова Л.В.* // ЖТФ. 2005. Т. 75. Вып. 4. С. 67.
- [4] *Шибков В.М., Двинин С.А., Ершов А.П., Шибкова Л.В.* // ЖТФ. 2005. Т. 75. Вып. 4. С. 74.
- [5] *Шибков В.М., Двинин С.А., Ершов А.П.* и др. // Физика плазмы. 2007. Т. 34. № 1. С. 77.
- [6] *Shibkov V.M., Aleksandrov A.F., Chernikov V.A.* et al. // J. of Propulsion and Power. 2009. Vol. 25. N 1. P. 123–137.
- [7] *Шибкова Л.В.* // Вестн. Моск. унив. Сер. 3. Физика. Астрономия. 2007. № 5. С. 62.
- [8] *Шибкова Л.В.* Физические процессы в движущейся плазме многокомпонентных инертных и химически активных смесей. Дисс. на соиск. уч. степ. д.ф.-м.н. М.: Объединенный институт высоких температур РАН, 2007. 367 с.
- [9] *Александров А.Ф., Шибков В.М., Шибкова Л.В.* // Вестн. Моск. унив. Сер. 3. Физика. Астрономия. 2008. № 5. С. 68.
- [10] *Александров А.Ф., Шибков В.М., Шибкова Л.В.* // Вестн. Моск. унив. Сер. 3. Физика. Астрономия. 2008. № 6. С. 65.
- [11] *Зацепин Д.В., Стариковская С.М., Стариковский А.Ю.* // Химическая физика. 2001. Т. 20. № 7. С. 66.
- [12] *Bozhenkov S.A., Starikovskaia S.M., Starikovskii A.Yu.* // Combust. Flame. 2003. Vol. 133. N 1–2. P. 133.
- [13] *Константиновский Р.С., Шибков В.М., Шибкова Л.В.* // Кинетика и катализ. 2005. Т. 46. № 6. С. 821.
- [14] *Кочетов И.В., Напартович А.П., Леонов С.Б.* // Химия высоких энергий. 2006. Т. 40. № 2. С. 1.
- [15] *Попов Н.А.* // Физика плазмы. 2008. Т. 34. № 5. С. 414.
- [16] *Шибков В.М., Шибкова Л.В.* // ЖТФ. 2009. Т. 79. № 10. С. 65–74.
- [17] *Герасимов Г.Н., Лягуценко Р.И., Старцев Г.П.* // Опт. и спектр. 1971. Т. 30. № 4. С. 606.
- [18] *Райзер Ю.П.* Физика газового разряда. М.: Наука, 1987.
- [19] *Шибкова Л.В., Шибков В.М.* Разряд в смесях инертных газов. М.: Физматлит, 2005.
- [20] *Алексеев Б.В., Котельников В.А.* Зондовый метод диагностики плазмы. М.: Энергоатомиздат, 1988. 240 с.
- [21] *Каган Ю.М., Перель В.И.* Зондовые методы исследования плазмы. // УФН. 1963. Т. LXXXI. Вып. 3. С. 409.