



Общероссийский математический портал

В. М. Шибков, Л. В. Шибкова, А. А. Карачев, Р. С. Константиновский, Воспламенение с помощью поверхностного СВЧ-разряда жидких углеводородов в условиях высокоскоростных воздушных потоков, *ТВТ*, 2010, том 48, дополнительный выпуск, 23–34

<https://www.mathnet.ru/tvt921>

Использование Общероссийского математического портала Math-Net.Ru подразумевает, что вы прочитали и согласны с пользовательским соглашением
<https://www.mathnet.ru/rus/agreement>

Параметры загрузки:

IP: 18.97.9.173

24 апреля 2025 г., 06:07:40



УДК 533.9

ВОСПЛАМЕНЕНИЕ С ПОМОЩЬЮ ПОВЕРХНОСТНОГО СВЧ-РАЗРЯДА ЖИДКИХ УГЛЕВОДОРОДОВ В УСЛОВИЯХ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ВОЗДУШНЫХ ПОТОКОВ

© 2010 г. В. М. Шибков, Л. В. Шибкова, А. А. Карачев, Р. С. Константиновский

*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
физический факультет*

Поступила в редакцию 15.09.2009 г.

В условиях поверхностного СВЧ-разряда, создаваемого в неподвижном воздухе при атмосферном давлении, реализовано быстрое нетепловое плазменно-стимулированное воспламенение тонких пленок бензина и керосина. Показано, что в зависимости от подводимой мощности период индукции изменяется от 10 до 100 мкс, плазменно-стимулированное воспламенение происходит на антенне в области существования поверхностного СВЧ-разряда, скорость распространения передней границы области интенсивного горения около антенны достигает 350 м/с. Исследовано влияние неравновесной плазмы поверхностного СВЧ-разряда на процессы воспламенения тонких пленок спирта, бензина и керосина в условиях до- и сверхзвукового воздушного потока. Показано, что поперечная скорость распространения фронта горения не зависит от скорости потока и равна 80 м/с, воспламенение происходит при температуре порядка 1000 К, а температура пламени – порядка 3000 К.

PACS: 52.80.-s, 52.40.Fd, 52.70.-m, 82.33.Xj, 82.33.Vx

ВВЕДЕНИЕ

Возможности использования низкотемпературной газообразной плазмы для воспламенения сверхзвуковых газообразных воздушно-углеводородных потоков уже более десяти лет активно изучаются в различных научных коллективах как в России, так и за рубежом. Ежегодно проводятся международные конференции (The International Workshops on Weakly Ionized Gases, USA; The International Workshops on Magneto- and Plasma Aerodynamics for Aerospace Applications, Russia, Moscow; The International Workshops “Thermochemical and Plasma Processes in Aerodynamics”, Russia, Saint-Petersburg), на которых рассматриваются вопросы, связанные с применением низкотемпературной плазмы в аэродинамике. В этих работах показано, что большинство типов газовых разрядов может приводить к воспламенению высокоскоростных горючих потоков. Однако период индукции сильно отличается для различных газоразрядных систем. Например, наносекундные высоковольтные разряды, существующие при больших значениях приведенного электрического поля $E/n = 100\text{--}1000$ Тд, приводят к эффективному быстрому воспламенению неподвижных воздушно-углеводородных смесей [1], однако в случае движущихся горючих смесей с ростом скорости эффективность воспламенения резко падает и уже при скорости потока 70 м/с горения в

условиях наносекундного разряда, создаваемого в импульсно-периодическом режиме, не происходит [2]. Применение застойной зоны в виде прямоугольной каверны, куда вводилось дополнительное количество горючего, повышает эффективность горения, однако пламя из каверны стационарно не выходит в основной поток, а процесс горения в канале происходит отдельными вспышками [3]. Что касается воспламенения углеводородов в жидкой фазе, то экспериментальных данных о влиянии газового разряда на динамику и кинетику плазменно-стимулированного горения в настоящее время явно недостаточно.

В условиях реального полета требуется реформировать (подготовить) жидкое топливо для использования в камере сгорания прямоточного воздушно-реактивного двигателя. Необходим поиск эффективного способа перевода жидкого топлива в мелкодисперсную суспензию, а также в парообразное состояние. Для уменьшения продольных размеров прямоточного двигателя при сверхзвуковых режимах полета летательного аппарата необходимо также оптимизировать режим создания низкотемпературной газоразрядной плазмы с целью быстрого воспламенения жидкого углеводородного топлива, а также увеличения скорости распространения горения.

В данной работе влияние неравновесной плазмы на период индукции жидкого топлива в условиях

до- и сверхзвукового воздушного потока изучается на примере воспламенения с помощью самостоятельного импульсного поверхностного СВЧ-разряда тонких углеводородных (керосин, бензин) пленок.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

При помещении жидкости в вакуумную камеру происходит ее интенсивное испарение, что не позволяет исследовать процесс воспламенения с помощью поверхностного СВЧ-разряда углеводородного топлива в жидкой фазе при давлениях воздуха в барокамере меньше атмосферного по аналогии с экспериментами по воспламенению сверхзвуковых пропан-воздушных потоков. Для изучения процесса воспламенения жидких углеводородов необходимо проводить эксперименты при атмосферном давлении. Система подвода электромагнитной энергии к антенне, разработанная в [4–6], позволяет создать поверхностный СВЧ-разряд в широком диапазоне давлений, в том числе и при атмосферном давлении воздуха при подводимой импульсной СВЧ-мощности 20–80 кВт. А это позволяет исследовать процесс воспламенения жидких углеводородов при атмосферном давлении воздуха с помощью поверхностного СВЧ-разряда в условиях высокоскоростного воздушного потока. Воспламенение углеводородов в жидкой фазе изучалось на примере бензина и керосина, наносимых тонким слоем на верхнюю и нижнюю поверхности кварцевой антенны, на которой создавался поверхностный СВЧ-разряд. Обеспечение в различных реализациях полностью идентичного нанесения тонких пленок жидких углеводородов является трудной экспериментальной задачей. Использование для этих целей пульверизатора приводит к образованию капелек жидкости, а пленки получаются неоднородными по длине антенны. Поэтому для нанесения жидких пленок на поверхность антенны в экспериментах использовалась мягкая кисть (“беличий хвостик”) с диаметром, равным ширине антенны. Используемый компрессор давал возможность нагнетать в ресивер высокого давления воздух до давления 6 атм, что позволяло создавать высокоскоростные воздушные потоки с заданной скоростью при атмосферном давлении в барокамере.

Для исследования возможности воспламенения с помощью поверхностного СВЧ-разряда высокоскоростных углеводородных потоков использовалась экспериментальная установка, включающая в себя вакуумную камеру, ресивер высокого давления воздуха, систему для создания сверхзвукового воздушного потока, магнетронный генератор, систему для ввода СВЧ-энергии в камеру, прямоугольный

аэродинамический канал, высоковольтный источник питания, систему синхронизации и диагностическую аппаратуру. Основной экспериментальной установкой являлась откачиваемая металлическая цилиндрическая барокамера, которая одновременно служила как для обеспечения необходимого давления при исследовании свойств поверхностного СВЧ-разряда в неподвижном газе, так и для создания высокоскоростного потока, а также использовалась в качестве резервуара для выхлопных газов и продуктов горения. Внутренний диаметр вакуумной камеры равен 1 м, ее длина – 3 м.

Высокоскоростной поток создавался при заполнении барокамеры воздухом через специально профилированное сопло Лаваля, установленное на выходной трубке электромеханического клапана. Электромеханический клапан, закрепленный на внешней поверхности камеры, герметически соединял канал с ресивером высокого давления ($p_1 = 1–6$ атм) воздуха. При открытии электромеханического клапана воздух поступал через переходную камеру на вход сопла, где формировался высокоскоростной поток с необходимой скоростью. Для синхронизации работы электромеханического затвора и разряда использовалась специальная схема, обеспечивающая временную задержку между включением разряда и открытием клапана. Открытие электромеханического клапана осуществлялось с помощью импульсного блока питания, работа которого синхронизировалась с блоком питания магнетрона. В условиях экспериментов направление сверхзвукового потока было противоположно направлению распространения поверхностной СВЧ-волны.

Источником СВЧ-излучения служил импульсный магнетронный генератор сантиметрового диапазона длин волн. Магнетронный генератор имел следующие характеристики: длина волны $\lambda = 2.4$ см, импульсная СВЧ-мощность $W < 80$ кВт, длительность импульса $\tau = 5–150$ мкс, скважность $Q = 1000$. Для питания магнетрона использовался импульсный модулятор с частичным разрядом накопительной емкости. Микроволновая мощность подводилась к разрядной камере с помощью волноводного тракта прямоугольного сечения 9.5×19 мм². Для измерения СВЧ-мощности, поступающей в разрядную камеру, в волноводный тракт был введен направленный ответвитель, который ответвляет часть СВЧ-энергии в измерительное плечо, содержащее аттенюатор и секцию с кристаллическим детектором. Огибающая СВЧ-импульса с выхода детектора регистрировалась на цифровом осциллографе. Форма огибающей близка к прямоугольной. Этот же сигнал поступал на вход импульсного цифрового вольтметра, по показаниям которого определялась амплитуда мик-

роволнового импульса, для чего предварительно производилась калибровка вольтметра с помощью калориметрического измерителя мощности, который во время калибровки подключался к выходу основного плеча направленного ответвителя.

Система хранения воздуха высокого давления состояла из газгольдера объемом 0.4 м^3 с компрессором, поднимающим давление воздуха до максимальной величины $p = 6 \text{ атм}$; клапана высокого давления; запорного клапана и электромагнитного клапана с временем срабатывания $t \sim 1 \text{ мс}$. Расход воздуха в течение эксперимента измерялся по величине изменения давления в ресивере или датчиком динамического давления, установленным прямо за электромагнитным клапаном системы подачи воздуха. Воздух первоначально поступал в промежуточную камеру в дозвуковой части канала. Прямо за этой камерой было установлено сверхзвуковое сопло Лавала.

Процесс инициирования воспламенения с помощью неравновесной плазмы поверхностного СВЧ-разряда жидких углеводородных пленок изучался как в неподвижном, так и в высокоскоростном потоке воздуха. Скорость воздушного потока изменялась от 10 до 440 м/с при атмосферном давлении $p_0 = 760 \text{ Тор}$ неподвижного воздуха в вакуумной камере.

МЕТОДЫ ДИАГНОСТИКИ

Диагностический комплекс, используемый для исследования процесса воспламенения жидких углеводородов, включал в себя следующее оборудование: оптические рефракционные датчики, коллимированные фотоэлектронные умножители, импульсную теневую установку, термопары, систему для измерения проводимости пламени, электрические зонды, двухпроводную линию для измерения поглощения 8-миллиметрового микроволнового зондирующего излучения в пламени, монохроматоры и спектрографы, цифровые осциллографы, цифровые фото- и кинокамеры, кварцевые световоды, линзы, зеркала и др.

Процесс воспламенения жидких углеводородов в условиях поверхностного СВЧ-разряда фиксировался при различных длительностях и мощностях СВЧ-импульсов с использованием цифрового фотоаппарата D50 и цифровой видеокамеры "Видео-Спринт" с электронно-оптическим наносекундным затвором. При последующем воспроизведении изображений на мониторе компьютера можно было измерить размеры области горения и определить скорость распространения фронта горения.

Спектр излучения пламени фиксировался с помощью цифрового двухканального спектрографа

AvaSpec-2048-2-DT фирмы Avantes. Температура газа T_g определялась из сравнения экспериментально измеренных и синтезированных молекулярных полос (0;0) и (1;1) циана с длинами волн кантов $\lambda = 388.3 \text{ нм}$ и $\lambda = 387.1 \text{ нм}$, а также полос системы Свана молекулярного углерода (полосы (0;0) $\lambda = 516.52 \text{ нм}$, (1;1) $\lambda = 512.93 \text{ нм}$, (2;2) $\lambda = 509.77 \text{ нм}$). При моделировании спектра распределение по вращательным и колебательным уровням предполагалось бальцмановским. Использовались программы для расчета спектров и отдельно для расчета факторов Хенля–Лондона. Расчеты производились в среде Matlab по программе, позволяющей накладывать заранее заданное уширение на вращательные переходы, полученные при расчете молекулярного спектра.

Для изучения динамики воспламенения углеводородов использовались оптические рефракционные датчики и коллимированный фотоэлектронный умножитель. Оптические рефракционные датчики включали в себя газовые He–Ne-лазеры, систему формирования и перемещения в пространстве лазерных лучей, фотоэлектронные умножители с входными регулируемые щелями. Работа оптического рефракционного датчика основана на принципе отклонения лазерного луча на скачках плотности нейтрального газа. Коллимированный фотоэлектронный умножитель регистрировал излучение из заранее заданной малой (порядка 1–2 мм) области пространства на различных расстояниях от поверхности антенны. Для визуализации ударных волн и газодинамических возмущений, возникающих при воспламенении углеводородного горючего, применялась импульсная теневая установка. В качестве источника света для теневой установки использовалась лампа-вспышка с длительностью импульса $\tau = 4 \text{ мкс}$, что позволяло получать теневые фотографии исследуемого процесса с временным разрешением. Оптическая система теневой установки позволяла формировать параллельный пучок света диаметром 150 мм с однородным распределением интенсивности света по сечению пучка. Изменение тепловых потоков, идущих от антенны, на которой и создавался поверхностный СВЧ-разряд, приводящий к воспламенению жидких углеводородных пленок, регистрировалось с помощью термопары.

Регистрация факта воспламенения жидких углеводородных пленок и оценка величины степени ионизации газа проводились при измерении проводимости пламени. С этой целью использовался плоский конденсатор, расположенный на пути распространения пламени. В условиях эксперимента измерялась временная задержка между моментом включения импульсного СВЧ-разряда, который инициировал воспламенение, и моментом появления

электрического сигнала на измерительном сопротивлении R , включенном в цепь, состоящую из источника питания и плоского конденсатора. По этим измерениям определялись факт воспламенения, минимальная длительность СВЧ-импульса, необходимая для воспламенения жидких углеводородных пленок, а также скорость распространения пламени в перпендикулярном поверхности антенны направлении. Концентрация заряженных частиц в пламени при горении жидких углеводородов в условиях поверхностного СВЧ-разряда измерялась также и с помощью двойного зонда. В эксперименте использовались симметричные зонды диаметром 1 мм, длиной рабочей части 10 мм и расстоянием между центрами зондов 5 мм. Измерения концентрации ионов проводились по ионному току насыщения, для этого между зондами подавалось постоянное смещение 36 В. 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. Концентрация электронов в различных областях пространства вблизи поверхности антенны, где происходит воспламенение жидких углеводородных пленок, и на различных расстояниях от нее определялась также и при измерении поглощения диагностического СВЧ-излучения миллиметрового диапазона длин волн. Для этого использовались милливаттный СВЧ-генератор с перестраиваемой длиной волны в диапазоне $\lambda = 4-8$ мм, двухпроводная линия и кристаллический СВЧ-детектор, регистрирующий уровень прошедшего через двухпроводную линию сигнала. 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. При отсутствии пламени в зоне двухпроводной линии на осциллографе с кристаллического детектора регистрировался сигнал постоянной амплитуды. При попадании ионизированной области в зону двухпроводной линии сигнал с кристаллического детектора уменьшался. При этом полная отсечка (отсутствие сигнала на выходе кристаллического детектора) соответствовала величине $(n_e L) \sim 10^{13}$ см⁻³. При малых поглощениях концентрация электронов прямо пропорциональна величине поглощения.

В экспериментах факт воспламенения сверхзвукового потока углеводородного топлива определялся по появлению характерного свечения вниз по

потоку от разрядной области. В случае создания разряда в сверхзвуковом потоке воздуха никакого свечения вниз по потоку не наблюдалось. Воспламенение регистрировалось также по изменению общего вида поверхностного СВЧ-разряда при зажигании сверхзвукового углеводородного потока. Для подтверждения факта воспламенения снималась теневая картина области возникновения пламени, а также использовались рефракционные лазерные датчики и термопары.

Период индукции определялся одновременно несколькими способами: 1) по минимальной длительности разрядного импульса, приводящего к появлению характерного свечения вниз по потоку; 2) по резкому возрастанию интенсивности свечения; 3) по времени появления сигнала с двойного зонда; 4) по времени возникновения тока через плоский конденсатор, расположенный на пути распространения пламени; 5) по резкому изменению общего вида спектра излучения ионизированной области; 6) по резкому увеличению поглощения зондирующего 8-миллиметрового излучения; 7) по резкому увеличению температуры газа.

ПЛАЗМЕННО-СТИМУЛИРОВАННОЕ ВОСПЛАМЕНЕНИЕ В НЕПОДВИЖНОМ ВОЗДУХЕ

Поверхностный СВЧ-разряд при высоких давлениях, когда частота упругого взаимодействия электронов с молекулами воздуха превышает круговую частоту электромагнитного излучения, представляет собой сложную систему, состоящую из тонких ветвящихся плазменных каналов диаметром от 0.1 до 1 мм в зависимости от длительности воздействия, давления газа и подводимой СВЧ-мощности [4–6]. На рис. 1 приведена фотография поверхностного СВЧ-разряда при давлении воздуха $p = 760$ Тор. Основные свойства создаваемого на внешней поверхности кварцевой антенны СВЧ-разряда при высоких давлениях воздуха исследованы в [6–8]. В частности, в этих работах показано, что продольная скорость распространения разряда достигает нескольких километров в секунду, концентрация электронов в каналах – порядка 10^{16} см⁻³, в течение первых 10 мкс воздух быстро нагревается

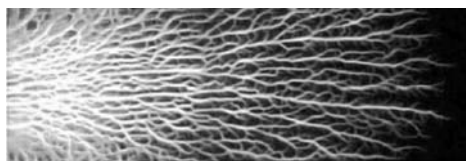


Рис. 1. Общий вид сверхповерхностного СВЧ-разряда при атмосферном давлении воздуха. Длительность импульса $\tau = 10$ мкс, импульсная мощность $W = 75$ кВт, СВЧ-энергия распространяется слева направо, ширина антенны – 18 мм.



Рис. 2. Интегральная (без временного разрешения) фотография воспламенения с помощью импульсного поверхностного СВЧ-разряда в неподвижном воздухе тонкой пленки бензина, нанесенной только на верхнюю поверхность горизонтально расположенной антенны. Давление воздуха – 760 Тор, длительность СВЧ-импульса – 100 мкс, импульсная СВЧ-мощность – 55 кВт, время экспозиции кадра $t = 2$ с.

до температуры ~ 1000 К, поэтому формирование разряда сопровождается генерацией ударных волн, скорость распространения которых вблизи антенны достигает 1 км/с. Именно такого типа разряд использовался в данной работе для воспламенения жидких углеводородов в высокоскоростных воздушных потоках.

В [5, 8, 9] были исследованы основные свойства пламени, возникающего при воспламенении на вертикально расположенной антенне тонкой пленки спирта с помощью поверхностного СВЧ-разряда в неподвижном воздухе. В настоящей работе была изменена конфигурация эксперимента, при этом антенна размещалась горизонтально. На рис. 2 представлена интегральная фотография процесса горения в условиях поверхностного СВЧ-разряда в неподвижном воздухе пленки бензина, нанесенной только на верхнюю поверхность горизонтально расположенной антенны. Результаты высокоскоростной съемки показывают, что во время воспламенения интенсивность свечения максимальна и оно сосредоточено на расстоянии $y = 0-15$ мм от поверхности антенны, тогда как СВЧ-разряд существует только в тонком ($y = 0-1$ мм) приповерхностном слое. В дальнейшем интенсивность излучения пламени резко падает, светящаяся область начинает быстро подниматься вверх, формируя турбулентную грибообразную структуру. Спустя 3–5 мс интенсивность свечения в этом вихреобразном формировании начинает

снова нарастать, достигая максимального значения через 10 мс. При этом данная область распадается на движущиеся вверх отдельные формирования, свечение которых из-за остывания постепенно прекращается.

Для исследования эволюции воспламенения тонких жидких углеводородных пленок (бензин, керосин, спирт) регистрировался временной ход интенсивности свечения пламени при различных подводимых мощностях. В качестве примера на рис. 3 представлен временной ход свечения в процессе воспламенения пленки керосина. Видно, что при всех значениях СВЧ-мощности вначале наблюдается слабое свечение, соответствующее плазме поверхностного СВЧ-разряда. Выделяемая за это время СВЧ-энергия в жидкой углеводородной пленке достаточна для ее нагрева до температуры кипения, перевода части жидких углеводородов в парообразное состояние и к бурному закипанию оставшейся на поверхности антенны части жидкости. Это приводит к тепловому взрыву, следствием чего является инжектирование в окружающее пространство парообразной части углеводородов, а также мелких капелек жидкого топлива, движущихся со скоростью десятки метров в секунду. Из рис. 3 видно также, что спустя некоторое время, которое зависит от уровня подводимой к антенне энергии, начинается резкий рост интенсивности свечения. При малой мощности $W = 20$ кВт воспламенение происходит только в конце СВЧ-импульса длительностью 100 мкс. С ростом подводимой мощности время задержки воспламенения уменьшается. На рис. 4 представлена зависимость периода индукции при плазменно-стимулированном воспламенении тонкой пленки керосина от подводимой

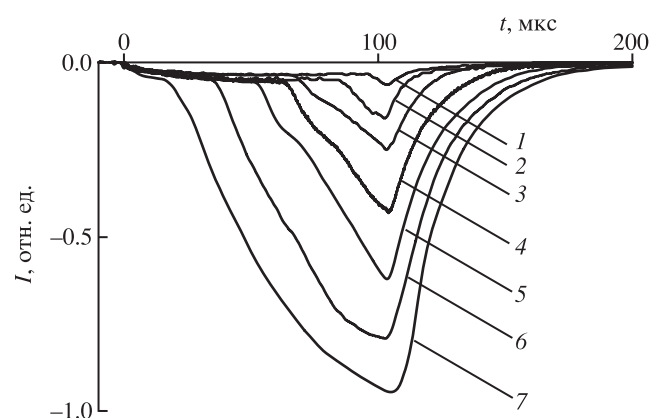


Рис. 3. Временной ход интенсивности свечения, зарегистрированный вблизи ($y = 5$ мм) поверхности кварцевой антенны коллимированным фотоэлектронным умножителем, при воспламенении тонкой пленки керосина с помощью поверхностного СВЧ-разряда при $p = 760$ Тор, $\tau = 105$ мкс и различных значениях импульсной СВЧ-мощности W : 1 – 20 кВт, 2 – 25, 3 – 30, 4 – 35, 5 – 40, 6 – 50, 7 – 70.

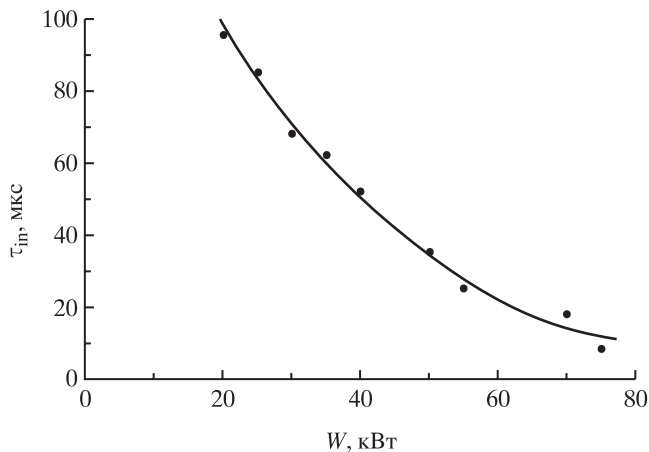


Рис. 4. Зависимость периода индукции в условиях плазменно-стимулированного воспламенения с помощью поверхностного СВЧ-разряда тонкой пленки керосина от подводимой СВЧ-мощности.

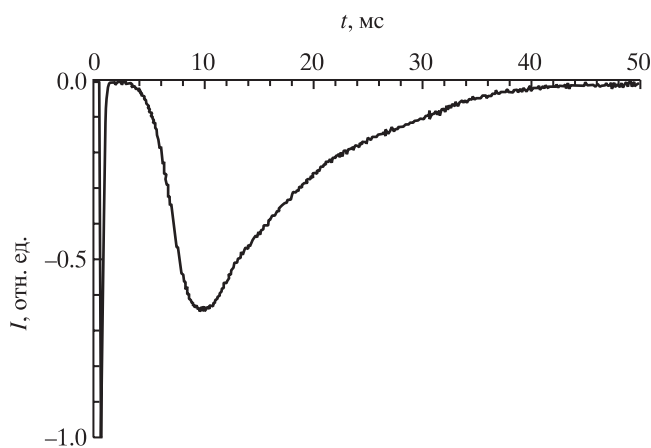


Рис. 5. Сигнал с коллимированного фотоэлектронного умножителя, зарегистрированный на расстоянии $y = 20$ мм от поверхности антенны при автовоспламенении керосина в воздухе в условиях поверхностного СВЧ-разряда при $\tau = 100$ мкс, $W = 55$ кВт, $p = 760$ Тор.

к антенне импульсной СВЧ-мощности. Видно, что при всех используемых для воспламенения тонкой пленки керосина значениях подводимой импульсной СВЧ-мощности период индукции находится в диапазоне 10–100 мкс, монотонно уменьшаясь с ростом мощности. Приблизительно линейное нарастание свечения (см. рис. 3) связано с плазменно-стимулированным неравновесным воспламенением тонкой пленки керосина вблизи антенны в условиях поверхностного СВЧ-разряда. К концу импульса длительностью 100 мкс интенсивность свечения пламени при плазменно-стимулированном горении керосина приблизительно в 20 раз превышает интенсивность свечения плазмы поверхностного СВЧ-разряда в начале импульса.

Из представленных на рис. 3 осциллограмм видно, что приблизительно через 100 мкс после

окончания СВЧ-импульса интенсивность свечения падает практически до нуля. Однако спустя время, равное нескольким миллисекундам после окончания СВЧ-импульса, свечение начинает снова нарастать. На рис. 5 представлен временной ход интенсивности свечения, зафиксированный с помощью коллимированного фотоэлектронного умножителя на расстоянии порядка 20 мм от поверхности антенны. Наблюдаемое на осциллограмме в течение первых 200 мкс свечение связано с попаданием на фотокатод коллимированного ФЭУ света, рассеянного конструктивными элементами установки от области плазменно-стимулированного горения керосина вблизи поверхности антенны в условиях поверхностного СВЧ-разряда при больших значениях приведенного электрического поля. Нарастание свечения спустя приблизительно 4 мс после окончания СВЧ-импульса связано с процессом автовоспламенения и догорания мелких жидких капелек, инжектируемых из зоны горения керосина у поверхности антенны, а также паров и газообразных продуктов деструкции жидких углеводородов, образующихся в условиях поверхностного СВЧ-разряда. Интенсивность свечения достигает максимального значения приблизительно на десятой миллисекунде и в дальнейшем медленно в течение тридцати миллисекунд уменьшается за счет остывания нагретого в этой области пространства газа. Эти данные хорошо согласуются с результатами по исследованию динамики воспламенения тонкой пленки бензина, полученными с помощью высокоскоростной цифровой видеокамеры. Из представленных на рис. 3–5 результатов можно сделать вывод о том, что в условиях проведенного эксперимента для тонких пленок бензина и керосина период индукции плазменно-стимулированного воспламенения с помощью поверхностного СВЧ-разряда равен нескольким десяткам микросекунд. В этих же условиях период индукции автовоспламенения углеводородных паров на два порядка больше и равен нескольким миллисекундам.

Для изучения динамики процесса плазменно-стимулированного воспламенения тонкой пленки жидкого углеводорода в условиях поверхностного СВЧ-разряда в воздухе атмосферного давления фиксировались поперечные размеры, достигаемые областью интенсивного горения бензина при различных длительностях СВЧ-импульса. По полученным результатам была определена скорость распространения передней границы области интенсивного горения жидких углеводородов в условиях низкотемпературной плазмы самостоятельного поверхностного СВЧ-разряда. Такие измерения проводились при варьировании подводимой к антенне СВЧ-мощности в пределах 20–75 кВт. В частности,

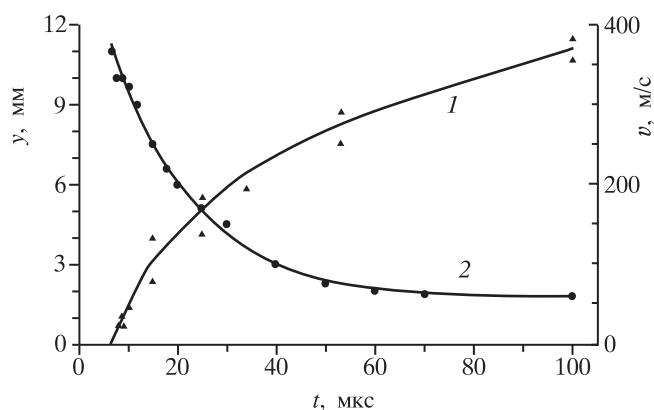


Рис. 6. Временные зависимости положения (1) и скорости (2) передней границы области интенсивного горения бензина в воздухе в условиях поверхностного СВЧ-разряда при $p = 760$ Тор, $\tau = 100$ мкс, $z = 1$ см, $W = 75$ кВт.

на рис. 6 представлены данные о положении и скорости передней границы области плазменно-стимулированного горения бензина в воздухе в условиях поверхностного СВЧ-разряда при подводимой импульсной СВЧ-мощности $W = 75$ кВт. Видно, что при этой мощности период индукции для плазменно-стимулированного воспламенения бензина равен 8 мкс. Использование СВЧ-импульсов с длительностью меньше 8 мкс при импульсной мощности 75 кВт не приводит к плазменно-стимулированному горению. С увеличением длительности импульса больше 8 мкс поперечные размеры области интенсивного горения бензина возрастают, достигая при $\tau = 100$ мкс величины 10–12 мм. Следует подчеркнуть, что в условиях поверхностного СВЧ-разряда воздух нагревается за 10–20 мкс приблизительно до 1000 К [6–9]. При этой температуре период индукции для автовоспламенения жидких углеводородов находится в миллисекундном диапазоне времени. Поэтому в условиях низкотемпературной неравновесной плазмы поверхностного СВЧ-разряда наблюдается плазменно-стимулируемый нетепловой механизм воспламенения, так же как и при воспламенении с помощью поверхностного СВЧ-разряда сверхзвукового пропан-воздушного потока [5, 10–14]. При этом скорость распространения передней границы области интенсивного горения вблизи поверхности антенны при наличии сильного электрического поля достигает значения 350 м/с, с увеличением расстояния от поверхности антенны скорость уменьшается и на расстоянии $y = 10$ мм падает до 50 м/с, что все равно значительно выше скорости распространения фронта при нормальном горении углеводородов. Следует отметить, что регистрируемая чрезвычайно высокая скорость распространения передней границы области интенсивного горения вблизи поверхности антенны может определяться влиянием параметров

газоразрядной плазмы (высокая степень ионизации, большое количество возбужденных частиц и активных радикалов, быстрый нагрев газа), влиянием собственного ультрафиолетового излучения, генерируемого в плазме разряда, существующего при больших значениях приведенного электрического поля, а также влиянием гидро- и газодинамических эффектов, возникающих при создании поверхностного СВЧ-разряда. При этом необходимо учитывать движение газа, вызванное ударными волнами, инициируемыми поверхностным СВЧ-разрядом, и связанное с расширением продуктов горения жидких углеводородов вблизи антенны.

Для подтверждения этого вначале с использованием теневой фотографии была исследована подробная эволюция газодинамических возмущений, возникающих при воспламенении бензина на вертикально расположенной антенне. Для регистрации теневой картины использовалась цифровая фотокамера без синхронизации со временем экспозиции каждого кадра 2 с. Поэтому в теневой установке для получения временного разрешения применялась лампа-вспышка с длительностью импульса 4 мкс. Однако интенсивное свечение пламени, возникающего при плазменно-стимулированном горении тонкой пленки бензина, а также свечение во время автовоспламенения паров бензина были настолько сильны, что проникали через диафрагму теневой установки и фиксировались фотокамерой. Поэтому на каждом кадре можно видеть теневую картину, снятую в фиксированный момент времени, и одновременно с этим интегральный вид пламени за все время его существования. Результаты приведены на рис. 7, где представлены только те кадры, которые необходимы для понимания исследуемого процесса. Видно, что на двадцатой микросекунде (рис. 7, кадр 1), когда еще не происходит воспламенение тонкой пленки бензина, на теневой картине не фиксируется никаких газодинамических возмущений. После воспламенения наблюдаются отходящие от области плазменно-стимулированного горения бензина ударные волны (кадры 2 и 3). В то же время вблизи поверхности антенны из-за повышения температуры газа начинает формироваться турбулентная неоднородная область (каверна) с резкими градиентами плотности на внешних границах. Движение области нагретого газа с пониженной плотностью определяется состоянием газа, приводимого в движение за фронтом ударной волны, а также связано с расширением продуктов горения углеводорода. При воспламенении жидкой углеводородной пленки на вертикально расположенной антенне каверна должна бы двигаться из-за конвективных потоков вверх, но так как отходящая от антенны ударная волна приводит в движение

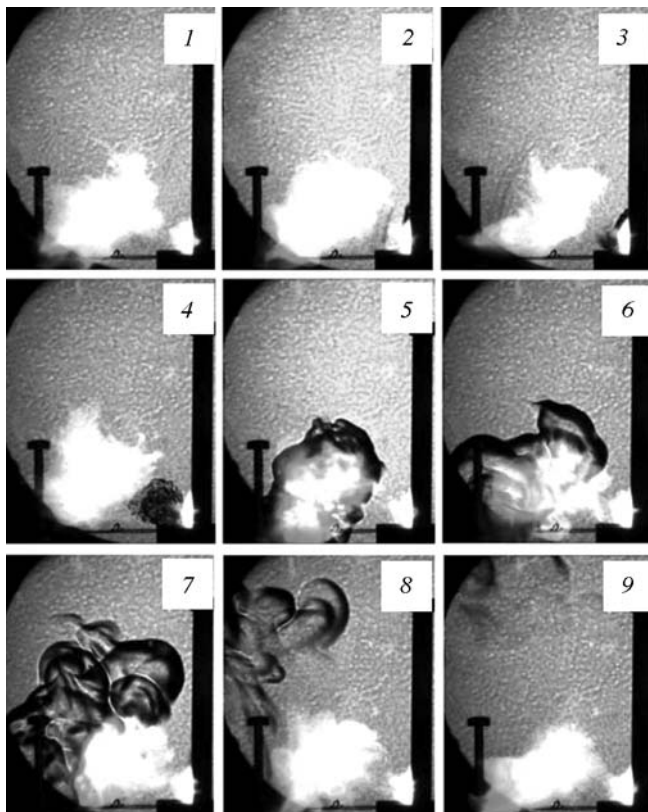


Рис. 7. Динамика газодинамических возмущений при воспламенении тонкой пленки бензина с помощью поверхностного СВЧ-разряда на вертикально расположенной диэлектрической антенне при $p = 760$ Тор, $W = 55$ кВт, $\tau = 100$ мкс. Время экспозиции каждого кадра – 2 с. Длительность импульса лампы-вспышки – 4 мкс. Время задержки момента съемки относительно переднего фронта СВЧ-импульса t : 1 – 0.02 мс, 2 – 0.06, 3 – 0.2, 4 – 1, 5 – 20, 6 – 50, 7 – 100, 8 – 200, 9 – 500.

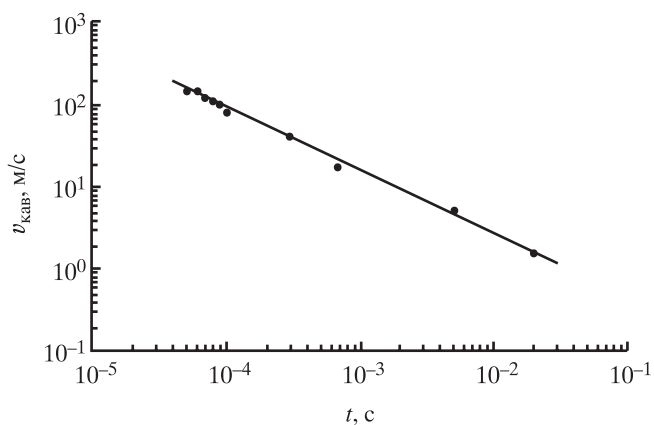


Рис. 8. Временная зависимость скорости распространения переднего фронта газовой каверны, возникающей при воспламенении бензина в условиях поверхностного СВЧ-разряда при $p = 760$ Тор, $W = 55$ кВт, $\tau = 100$ мкс.

газ в горизонтальном направлении со скоростью 100–300 м/с, то и каверна вслед за фронтом ударной волны движется вначале в горизонтальном направлении (кадры 4–6), достигая через 100 мс от

начала воспламенения точек пространства, расположенных на расстоянии $y = 100$ мм от поверхности антенны, а затем начинает всплывать вверх (кадры 7–9) из-за интенсивных конвективных тепловых потоков. К моменту времени $t = 500$ мс от начала воздействия в окрестности антенны восстанавливается однородное распределение плотности воздуха. На теневых фотографиях наряду с эволюцией области пониженной плотности нагретого газа видно яркое плазменное образование, расположенное на некотором расстоянии слева от поверхности антенны, где происходит первоначальное нетепловое плазменно-стимулированное воспламенение бензина. Происхождение этого светящегося плазменного образования связано с тем, что по мере движения нагретой газовой каверны через несколько миллисекунд в ней происходит автовоспламенение продуктов деструкции бензина при наличии активных частиц и радикалов, наработанных в области поверхностного СВЧ-разряда.

Исследованная пространственно-временная эволюция газодинамических возмущений позволила получить временную зависимость положения переднего фронта газовой каверны, возникающей при воспламенении бензина в условиях поверхностного СВЧ-разряда, и рассчитать скорость распространения переднего фронта газовой каверны (рис. 8). Видно, что в начальные моменты времени скорость распространения переднего фронта каверны превышает 100 м/с и по мере ее движения уменьшается до нескольких метров в секунду.

Проведенные спектральные измерения показали, что в зоне интенсивного горения керосина в условиях сильного электрического поля в спектре плазменно-стимулированного горения наблюдались интенсивные молекулярные полосы циана и Свана, а также сплошной спектр. При этом интенсивность сплошного спектра по отношению к молекулярным полосам в случае горения керосина в несколько раз больше, чем при горении бензина в этих же условиях. На расстоянии $y = 2$ мм от поверхности антенны, на которой создавался поверхностный СВЧ-разряд, воспламеняющий тонкую пленку керосина в неподвижном воздухе при давлении $p = 760$ Тор, температура пламени измерялась по молекулярным полосам циана. Временной ход температуры пламени при различных значениях подводимой импульсной СВЧ-мощности представлен на рис. 9. Видно, что задержка воспламенения уменьшается с увеличением подводимой СВЧ-мощности, тогда как температура пламени при горении керосина почти не зависит от уровня СВЧ-мощности. Это подтверждает тот факт, что в условиях эксперимента происходило горение жидких углеводородов, а не СВЧ-разряд в парах керосина, так как

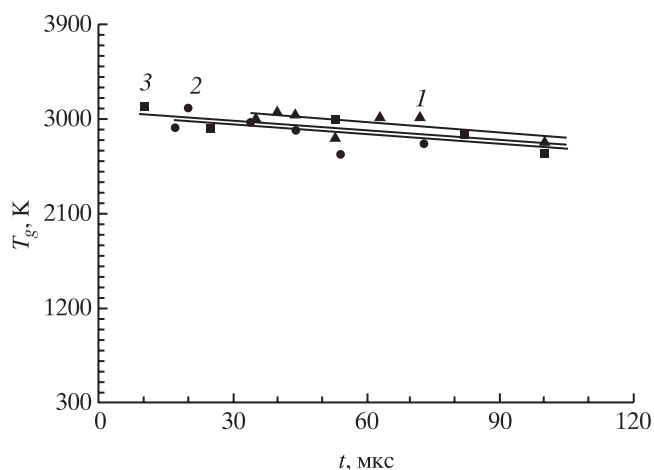


Рис. 9. Временной ход температуры пламени, измеренный на расстоянии $y = 2$ мм от поверхности антенны, на которой создается поверхностный СВЧ-разряд длительностью $\tau = 100$ мкс, воспламеняющий керосин в неподвижном воздухе при давлении $p = 760$ Тор и различных значениях подводимой импульсной СВЧ-мощности W : 1 – 50 кВт, 2 – 60, 3 – 70.

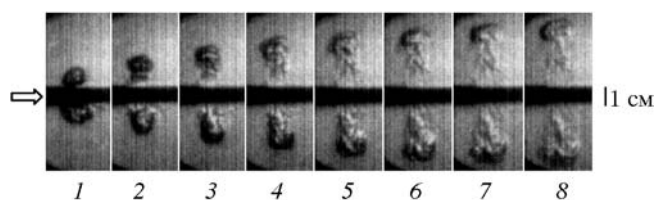


Рис. 10. Динамика газодинамических возмущений при воспламенении тонкой пленки керосина с помощью поверхностного СВЧ-разряда на горизонтально расположенной диэлектрической антенне при $p = 760$ Тор, $W = 55$ кВт, $\tau = 100$ мкс. Стрелкой показано направление распространения СВЧ-энергии. Время экспозиции каждого кадра равно 2 мкс. Время задержки момента съемки относительно переднего фронта СВЧ-импульса t : 1 – 1.4 мс, 2 – 2.8, 3 – 4.2, 4 – 5.6, 5 – 8.0, 6 – 9.4, 7 – 10.8, 8 – 12.2.

в этом случае с ростом подводимой мощности должна была бы увеличиваться газовая температура. При воспламенении температура пламени в условиях сильных электрических полей разряда была равна 3000 К и незначительно уменьшалась к концу импульса при всех исследованных уровнях подводимой мощности. При удалении от антенны интенсивность молекулярных полос резко падала, и на расстоянии 20 мм от поверхности антенны наблюдался практически сплошной тепловой спектр. Оценки температуры пламени по сплошному спектру на расстоянии 20 мм от поверхности антенны дают величину ~ 2500 К.

Ударные волны, генерируемые при воспламенении с помощью импульсного поверхностного СВЧ-разряда тонкой пленки жидких углеводородов, приводят в движение газ в направлении, перпендикулярном поверхности антенны. Для подтвержде-

ния этого факта была измерена пространственно-временная эволюция газодинамических возмущений в условиях горизонтально расположенной антенны. Керосин наносился в одинаковом количестве как на верхнюю, так и нижнюю поверхности кварцевой антенны. Для регистрации динамики газодинамических возмущений при воспламенении тонкой пленки керосина на горизонтально расположенной диэлектрической антенне использовалась цифровая видеокамера, позволяющая регистрировать последовательность теневых фотографий со временем экспозиции каждого кадра 2 мкс при однократной реализации СВЧ-разряда. Быстрое плазменно-стимулированное воспламенение тонкой пленки керосина происходило одновременно на обеих поверхностях антенны. Полученные результаты представлены на рис. 10. Если бы не происходило генерации ударных волн и воздух вблизи антенны оставался неподвижным, то область нагретого газа вблизи нижней поверхности антенны за счет конвективных потоков должна была бы всплывать вверх. Однако эксперимент показывает, что области нагретого газа почти с одинаковой скоростью распространялись от верхней поверхности антенны вверх, а от нижней – вниз.

ПЛАЗМЕННО-СТИМУЛИРОВАННОЕ ВОСПЛАМЕНЕНИЕ В ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ПОТОКАХ ВОЗДУХА

Известно, что по своей физической природе поверхностный СВЧ-разряд, существующий на границе раздела двух сред с разным знаком диэлектрической проницаемости (плазма, имеющая отрицательную диэлектрическую проницаемость, и диэлектрик с положительной диэлектрической проницаемостью), локализован в тонком приповерхностном слое толщиной в данном случае меньше, чем 1 мм. Продольная скорость его распространения достигает 10 км/с, поэтому его можно создавать так же легко в сверхзвуковом потоке воздуха, как и в неподвижном газе. При его создании в потоке газа при высоких давлениях он целиком локализован в пограничном слое. А так как в пограничном слое скорость движения воздуха меньше, чем скорость в свободном потоке, то период индукции жидких углеводородных пленок не должен сильно отличаться от периода индукции в неподвижном воздухе. Для проверки этого предположения были проведены эксперименты по воспламенению жидких углеводородных пленок с помощью поверхностного СВЧ-разряда в дозвуковых и сверхзвуковых воздушных потоках.

На рис. 11 представлены фотографии горения спирта в высокоскоростных воздушных потоках

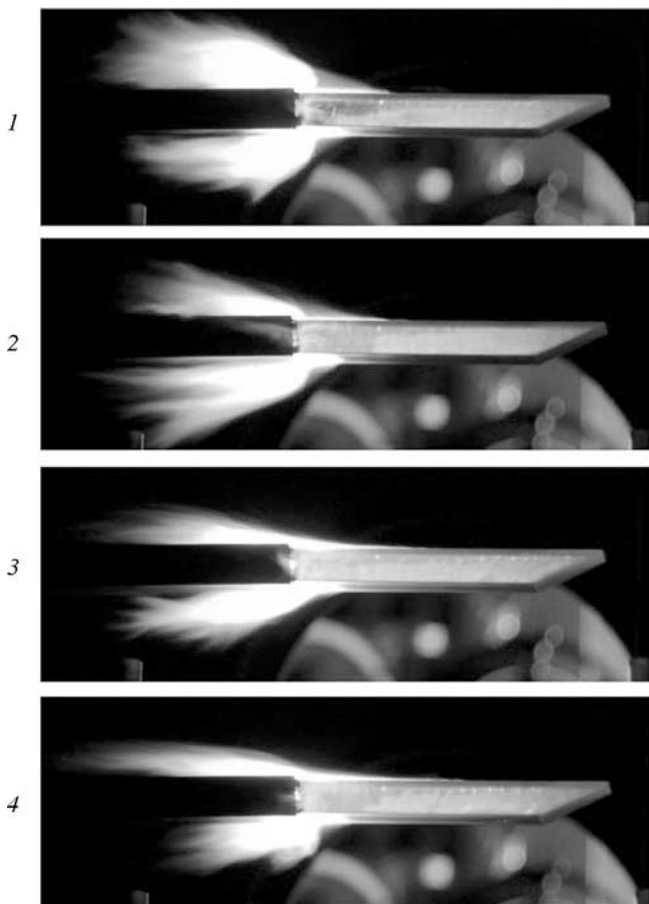


Рис. 11. Воспламенение спирта с помощью поверхностного СВЧ-разряда при $\tau = 120$ мкс, $p_0 = 760$ Тор, $W = 65$ кВт и различных скоростях воздушного потока v_f : 1 – 190 м/с, 2 – 260, 3 – 390, 4 – 440.

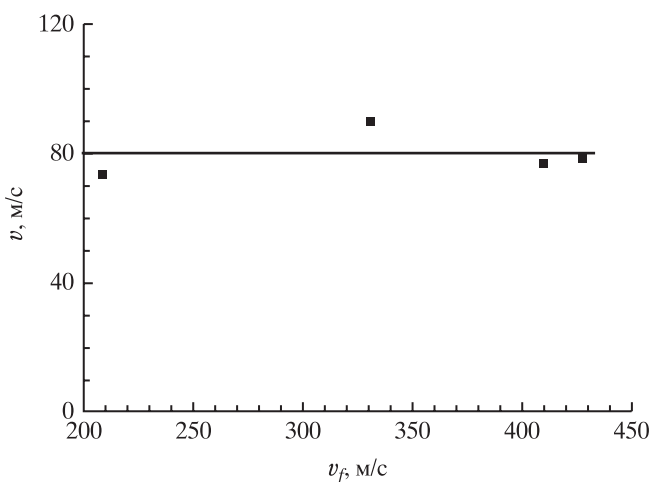


Рис. 12. Зависимость поперечной скорости распространения фронта горения спирта, воспламеняемого поверхностным СВЧ-разрядом, в зависимости от скорости воздушного потока: $\tau = 120$ мкс, $p_0 = 760$ Тор, $W = 65$ кВт.

при длительности СВЧ-импульса 120 мкс. Эксперименты показали, что и в дозвуковых (рис. 11, кадры 1 и 2), и в сверхзвуковых (рис. 11, кадры 3 и 4) воздушных потоках поверхностный СВЧ-разряд приводит к воспламенению тонкой пленки спирта. При этом на фотографиях у поверхности антенны отчетливо виден тонкий (толщиной порядка 1 мм), ярко светящийся слой, представляющий собой плазму поверхностного СВЧ-разряда. Воспламенение происходит в области существования поверхностного СВЧ-разряда в зоне подвода микроволновой энергии. При импульсной СВЧ-мощности 65 кВт воспламенение инициируется уже при длительности СВЧ-импульса 10 мкс. Как и в неподвижном воздухе, период индукции уменьшается от 100 до 5 мкс при увеличении подводимой СВЧ-мощности от 20 до 75 кВт. В дозвуковом потоке (см. рис. 11, кадр 1) воспламенение тонкой пленки спирта при импульсной мощности 65 кВт происходит уже на расстоянии 0.5 см от переднего фронта поверхностного СВЧ-разряда. По углу наклона границы горения к направлению воздушного потока можно определить поперечную скорость распространения фронта горения. С увеличением скорости потока (см. рис. 11) угол наклона границы горения уменьшается, однако в условиях эксперимента рассчитанная по этим данным поперечная скорость распространения фронта горения спирта не зависит от скорости потока (рис. 12). Экспериментально получено, что в условиях высокоскоростного воздушного потока скорость распространения фронта горения жидких углеводородов увеличивается от 50 до 100 м/с с ростом подводимой импульсной СВЧ-мощности от 45 до 75 кВт.

Данные теневого фотографирования процесса воспламенения и горения спирта на поверхности кварцевой антенны, обтекаемой дозвуковым потоком воздуха, зафиксированные в различные моменты времени существования поверхностного СВЧ-разряда и после выключения микроволновой энергии (рис. 13), подтверждают факт воспламенения пленки спирта в условиях высокоскоростного потока. Видно, что в данных условиях вначале поверхностный СВЧ-разряд приводит к генерации ударных волн, а затем к воспламенению спирта на поверхности антенны в зоне существования разряда. Горение спирта приводит к интенсивному нагреву воздуха и формированию в окрестности антенны области с пониженной плотностью газа, которая после выключения микроволновой энергии сносится в направлении воздушного потока.

Аналогичные результаты в условиях высокоскоростных воздушных потоков получены и при воспламенении керосина поверхностным СВЧ-разрядом. Была изучена пространственно-временная

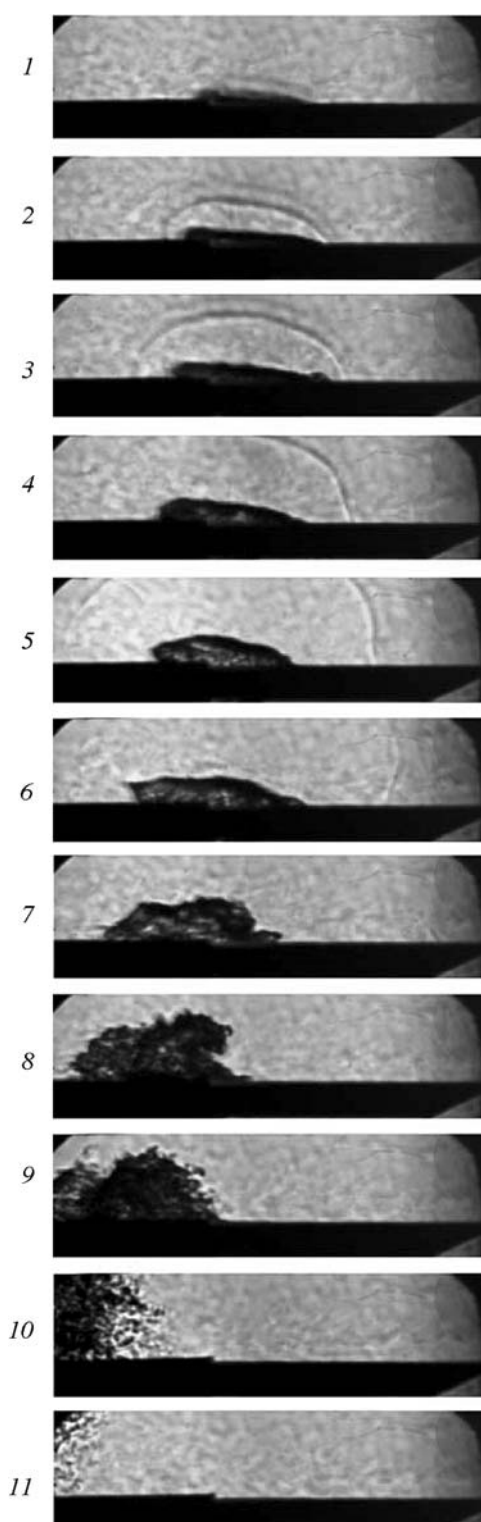


Рис. 13. Теневая фотография процесса воспламенения и горения спирта на поверхности кварцевой антенны, обтекаемой дозвуковым потоком воздуха, в условиях поверхностного СВЧ-разряда при $\tau = 120$ мкс, $p_0 = 760$ Тор, $W = 65$ кВт. Экспозиция каждого кадра – 4 мкс, время задержки регистрации теневой картины по отношению к переднему фронту СВЧ-импульса t : 1 – 10 мкс, 2 – 30, 3 – 50, 4 – 70, 5 – 100, 6 – 120, 7 – 200, 8 – 300, 9 – 500, 10 – 1000, 11 – 2000.

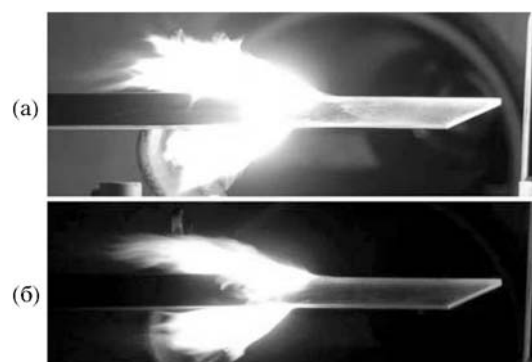


Рис. 14. Воспламенение керосина в условиях поверхностного СВЧ-разряда при $p_0 = 760$ Тор, $W = 65$ кВт, $\tau = 175$ мкс и различных значениях скорости потока воздуха v_f : (а) – 210 м/с, (б) – 400.

эволюция процесса воспламенения керосина на поверхности кварцевой антенны, обтекаемой сверхзвуковым воздушным потоком, при различных длительностях СВЧ-импульса. Оказалось, что воспламенение происходит в течение первых десяти микросекунд существования поверхностного СВЧ-разряда, т.е. при подводимой импульсной СВЧ-мощности 70 кВт период индукции в керосине составляет величину порядка 10 мкс, а скорость распространения передней границы области горения в этих условиях достигает 100 м/с.

На рис. 14 представлены интегральные фотографии общего вида антенны, на которой с помощью поверхностного СВЧ-разряда происходило воспламенение тонкой пленки керосина в условиях высокоскоростного воздушного потока при начальном давлении воздуха в барокамере $p_0 = 1$ атм. Скорость воздушного потока изменялась от дозвуковой $v_f = 210$ м/с (рис. 14а) до сверхзвуковой $v_f = 400$ м/с (рис. 14б). Из полученных результатов следует, что

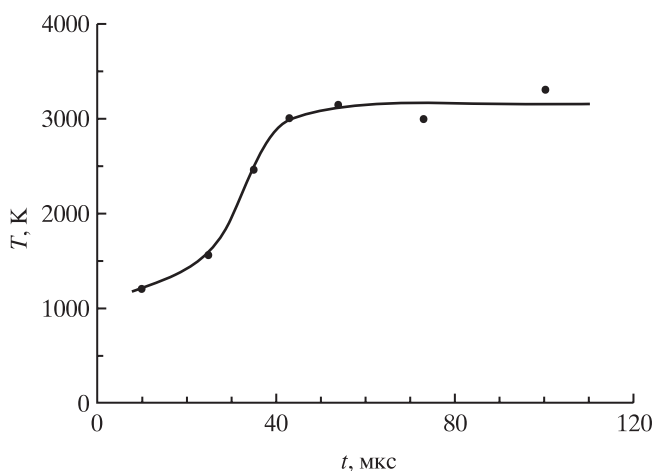


Рис. 15. Временной ход температуры газа при воспламенении керосина с помощью поверхностного СВЧ-разряда в условиях сверхзвукового воздушного потока: $v_f = 400$ м/с, $p_0 = 760$ Тор, $\tau = 120$ мкс, $W = 65$ кВт.

самостоятельный поверхностный СВЧ-разряд одинаково легко воспламеняет керосин в условиях как дозвукового, так и сверхзвукового потоков.

Временной ход температуры газа, измеренный в течение СВЧ-импульса, показывает (рис. 15), что в условиях поверхностного СВЧ-разряда, создаваемого в сверхзвуковом потоке воздуха, воспламенение тонкой пленки керосина начинает инициироваться спустя 10–20 мкс после начала воздействия, когда температура газа достигает приблизительно 1200 К. Температура пламени в условиях плазменно-стимулированного поверхностным СВЧ-разрядом воспламенения жидких углеводородов, нанесенных тонким слоем на кварцевую антенну, быстро увеличивается до 3200 К, что хорошо совпадает с данными, полученными при воспламенении тонких пленок спирта и бензина.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показано, что в условиях самостоятельного поверхностного СВЧ-разряда период индукции для воспламенения жидких пленок бензина и керосина в неподвижном воздухе атмосферного давления находится в микросекундном масштабе времен, уменьшаясь с увеличением подводимой СВЧ-мощности, а скорость распространения передней границы области интенсивного горения около антенны достигает 350 м/с. Показано также, что в условиях дозвуковых и сверхзвуковых воздушных потоков время задержки воспламенения с помощью поверхностного СВЧ-разряда жидких углеводородов составляет величину порядка 5–100 мкс. Поперечная скорость распространения фронта горения не зависит от скорости потока, воспламенение происходит при температуре порядка 1000 К, а температура горения – порядка 3000 К. Проведенные эксперименты подтверждают, что самостоятельный поверхностный СВЧ-разряд является эффективным средством быстрого плазменно-стимулированного воспламенения жидких углеводородов и может найти применение в плазменной аэродинамике.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Starikovskii A.Y., Anikin N.B., Kosarev I.N. et al.* Nanosecond-Pulsed Discharges for Plasma-Assisted Combustion and Aerodynamics // *J. Propulsion and Power*. 2008. V. 24. № 6. P. 1182.
2. *Adamovich I.V., Lempert W.R., Nishihara M. et al.* Repetitively Pulsed Nonequilibrium Plasmas for Magnetohydrodynamic Flow Control and Plasma-Assisted Combustion // *J. Propulsion and Power*. 2008. V. 24. № 6. P. 1198.
3. *Dutta A., Choi I., Uddi M. et al.* Cavity Flow Ignition and Flameholding in Ethylene-Air by a Repetitively Pulsed Nanosecond Discharge // *AIAA-2009-0821*. 2009.
4. *Шибкова Л.В.* Поверхностный сверхвысокочастотный разряд при высоких давлениях воздуха // *Вестн. МГУ. Сер. 3. Физика, астрономия*. 2007. Т. 48. № 5. С. 62.
5. *Шибкова Л.В.* Физические процессы в движущейся плазме многокомпонентных инертных и химически активных смесей. Дис. ...докт. физ.-матем. наук. М.: ОИВТ РАН, 2007.
6. *Шибков В.М., Шибкова Л.В., Карачев А.А.* Поверхностный сверхвысокочастотный разряд при повышенных давлениях воздуха // *ТВТ*. 2009. Т. 35. № 5. С. 650.
7. *Александров А.Ф., Шибков В.М., Шибкова Л.В.* Воспламенение углеводородных пленок в условиях поверхностного сверхвысокочастотного разряда // *Вестн. МГУ. Сер. 3. Физика, астрономия*. 2008. Т. 63. № 6. С. 65.
8. *Шибков В.М., Шибкова Л.В.* Динамика воспламенения тонких пленок спирта в условиях поверхностного СВЧ-разряда при атмосферном давлении воздуха // *ЖТФ*. 2009. Т. 79. Вып. 10. С. 65.
9. *Шибков В.М., Шибкова Л.В.* Параметры пламени, возникающего при воспламенении тонких пленок спирта с помощью поверхностного СВЧ-разряда // *ЖТФ*. 2010. Т. 80. Вып. 1. С. 59.
10. *Шибков В.М., Александров А.Ф., Ершов А.П. и др.* Воспламенение сверхзвукового потока углеводородного топлива с помощью сверхвысокочастотных разрядов // *Вестн. МГУ. Сер. 3. Физика, астрономия*. 2004. Т. 45. № 5. С. 67.
11. *Shibkov V.M., Aleksandrov A.F., Chernikov V.A. et al.* Microwave and Direct-Current Discharges in High-Speed Flow: Fundamentals and Application to Ignition // *J. Propulsion and Power*. 2009. V. 25. № 1. P. 123.
12. *Shibkov V.M., Gromov V.G., Konstantinovskij R.S.* Influence of Gas Discharge Plasma on Combustion of a High-Speed Hydrocarbon Flow // *Advanced Combustion and Aerothermal Technologies. Environmental Protection and Pollution Reductions* / Ed. Syred N., Khalatov A. Dordrecht, The Netherlands: Springer, 2007. P. 413.
13. *Константиновский Р.С., Шибков В.М., Шибкова Л.В.* Влияние газового разряда на воспламенение водородно-кислородной смеси // *Кинетика и катализ*. 2005. № 6. С. 821.
14. *Александров А.Ф., Шибков В.М., Шибкова Л.В.* Воспламенение высокоскоростных воздушно-углеводородных потоков с помощью поверхностного СВЧ-разряда // *Вестн. МГУ. Сер. 3. Физика, астрономия*. 2008. Т. 63. № 5. С. 68.