

04;09;11

Динамика воспламенения тонких пленок спирта в условиях поверхностного сверхвысокочастотного разряда при атмосферном давлении воздуха

© В.М. Шибков, Л.В. Шибкова

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
119991 Москва, Россия
e-mail: shibkov@phys.msu.ru

(Поступило в Редакцию 24 декабря 2008 г.)

В условиях поверхностного СВЧ-разряда, создаваемого в неподвижном воздухе при атмосферном давлении, реализовано быстрое нетепловое плазменно-стимулированное воспламенение жидких углеводородных (спирт) пленок. Определены период индукции и скорость распространения передней границы области интенсивного горения, инициируемого низкотемпературной плазмой поверхностного СВЧ-разряда, существующего при больших значениях приведенного электрического поля. Показано, что в зависимости от подводимой мощности период индукции изменяется от 10 до 100 μs , 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.

PACS: 52.80.-s, 52.40.Fd, 52.50.Dg, 51.50.+v

Введение

В настоящее время разработано множество способов воздействия, приводящих к развитию разветвленно-цепных реакций при горении углеводородов, в том числе и газовый разряд. В этой области плазменной аэродинамики исследования проводятся как в России, так и за рубежом [1–3]. Однако кинетика воспламенения в условиях низкотемпературной плазмы газового разряда при высоких значениях приведенного электрического поля остается не до конца ясной. Поэтому для более глубокого понимания физико-химических процессов, протекающих при инициировании воспламенения с помощью низкотемпературной плазмы жидких и газообразных углеводородов, необходимо наряду с математическим моделированием проводить экспериментальные исследования по выявлению влияния плазменных эффектов на период индукции и кинетику горения в условиях газовых разрядов, существующих при больших значениях приведенного электрического поля.

Для целей воспламенения газообразных углеводородно-воздушных смесей нами использовались разнообразные типы электродных и безэлектродных, объемных и поверхностных, несамостоятельных и самостоятельных, импульсных и стационарных разрядов. Такие разряды существуют при сильно отличающихся значениях такого важнейшего для физики газоразрядной плазмы параметра, как приведенное электрическое поле E/n (где E — амплитуда напряженности электрического поля, n — концентрация нейтральных частиц). Например, разряд постоянного тока поддерживается в сверхзвуковом потоке газа при низких значениях приведенного электрического поля $E/n = 10\text{--}30 \text{ Td}$, тогда как самостоятельный свободно локализованный СВЧ-

разряд, создаваемый сфокусированным пучком мощного электромагнитного излучения, существует при высоких значениях $E/n = 100\text{--}200 \text{ Td}$. 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.

Проведенные ранее эксперименты [1–15] показали, что наименьший период индукции при воспламенении сверхзвукового ($M = 2$) газообразного пропан-воздушного потока достигается именно при использовании самостоятельных СВЧ-разрядов. Поэтому с точки зрения эффективного воздействия на процессы быстрого воспламенения воздушно-углеводородных потоков особый интерес представляют сверхвысокочастотные разряды, так как они характеризуются большими значениями приведенного электрического поля и позволяют создавать неравновесную плазму в широком диапазоне давлений газа.

В настоящей работе описываются эксперименты по изучению процесса воспламенения и горения тонких пленок спирта в условиях самостоятельного поверхностного СВЧ-разряда, создаваемого на диэлектрической антенне. Так как летучие жидкости со свободной поверхностью, помещаемые в разрядную камеру, начинают быстро испаряться при понижении давления в ней, то эксперименты необходимо проводить при атмосферном давлении воздуха.

В работах [16–20] были исследованы основные свойства поверхностного СВЧ-разряда, создаваемого на тefлоновой антенне, расположенной в вакуумной камере при низких ($p < 1 \text{ Torr}$) и средних ($p = 10\text{--}50 \text{ Torr}$) давлениях воздуха, когда частота столкновений электронов

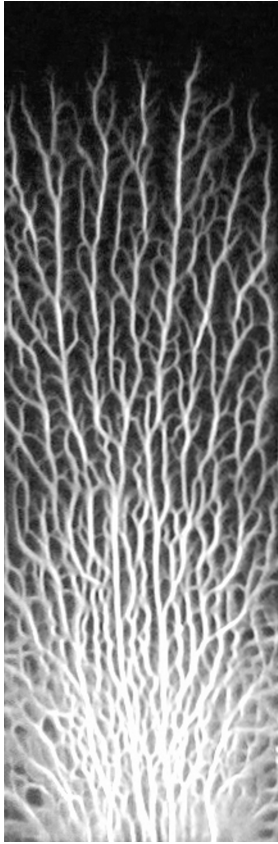


Рис. 1. Общий вид (вид спереди) поверхностного СВЧ-разряда при атмосферном давлении воздуха. Длительность импульса $\tau = 10 \mu\text{s}$, импульсная мощность $W = 75 \text{ kW}$, СВЧ-энергия распространяется снизу вверх.

с молекулами много меньше или одного порядка с круговой частотой электромагнитного поля. При этом из-за конструктивных особенностей тефлоновой антенны контакт металл-диэлектрик, инициирующий развитие разряда, был вынесен из области сильного электрического поля, что требовало высоких значений подводимой мощности для создания поверхностного СВЧ-разряда при высоких значениях давления воздуха. Поэтому в дальнейших работах [21–25] был изменен узел подвода СВЧ-энергии к антенне, а сама тефлоновая антенна была заменена на кварцевую. Это позволило технологически осуществить контакт кварцевой антенны с широкой стенкой металлического волновода, где для волны типа H_{01} амплитуда напряженности электрического поля максимальна. Такая система подвода энергии (металлический волновод — кварцевая антенна) позволила на порядок величины снизить мощность, необходимую для создания поверхностного СВЧ-разряда при атмосферном давлении. В частности, в экспериментах [21–23] был легко реализован СВЧ-разряд на поверхности кварцевой антенны при импульсной СВЧ-мощности всего 10–20 kW и атмосферном давлении воздуха в разрядной камере.

В качестве примера на рис. 1 представлена фотография поверхностного СВЧ-разряда, создаваемого на кварцевой антенне при давлении воздуха $p = 760 \text{ Torr}$. Разряд при высоких давлениях представляет собой сложную систему, состоящую из тонких ветвящихся плазменных каналов диаметром от 0.1 до 1 mm в зависимости от длительности воздействия, давления газа и подводимой СВЧ-мощности. В [26,27] исследованы основные свойства создаваемого на внешней поверхности кварцевой антенны СВЧ-разряда при высоких давлениях воздуха. В частности, показано, что продольная скорость его распространения достигает нескольких километров в секунду, концентрация электронов в каналах порядка 10^{16} cm^{-3} , в течение первых $10 \mu\text{s}$ воздух быстро нагревается до температуры $\sim 1000 \text{ K}$, поэтому формирование разряда сопровождается генерацией ударных волн, скорость распространения которых вблизи антенны достигает 1 km/s . Именно такого типа разряд используется нами в настоящей работе для воспламенения жидких углеводородных пленок. Следует отметить, что в экспериментах [28,29] получены сверхвысокочастотные разряды, близкие по структуре к используемому в данной работе поверхностному СВЧ-разряду.

Экспериментальная установка

Для изучения процесса воспламенения с помощью поверхностного СВЧ-разряда жидких углеводородных пленок использовалась экспериментальная установка, состоящая из расположенного горизонтально массивного стального диска, на котором монтируются магнетронный генератор, система подвода СВЧ-энергии к диэлектрической антенне и элементы диагностического оборудования. В центре диска вмонтирован волновод для подвода СВЧ-мощности к диэлектрической антенне, расположенной вертикально. Кроме того, на диске имеются специальные стойки, позволяющие размещать различные элементы диагностического оборудования и проводить их точную юстировку. В экспериментах использовались электрические зонды, термпары, двухпроводная линия, оптические рефракционные датчики, датчики давления, фотоэлектронные умножители, импульсная теньевая установка, система для измерения проводимости пламени, монохроматоры и спектрографы, цифровые осциллографы, фото- и кинокамеры, кварцевые световоды, линзы, зеркала.

В качестве источника СВЧ-излучения использовался импульсный магнетронный генератор сантиметрового диапазона длин волн. Магнетронный генератор мог работать либо в однократном режиме, либо в режиме частых посылок СВЧ-импульсов. Магнетрон имел следующие характеристики: длина волны — $\lambda = 2.4 \text{ cm}$; отдаваемая в тракт импульсная СВЧ-мощность — $W < 75 \text{ kW}$; длительность импульсов — $\tau = 5\text{--}100 \mu\text{s}$; частота повторения импульсов — $1\text{--}10 \text{ Hz}$; скважность в режиме повторяющихся импульсов — $Q = 1000$; при этом сред-

няя мощность не превышала 100 W. Питание магнетрона осуществляется импульсным модулятором с частичным разрядом накопительной емкости. СВЧ-мощность подводится к антенне с помощью волноводного тракта прямоугольного сечения 9.5×19 mm. Для измерения СВЧ-мощности в волноводный тракт введен направленный ответвитель, с помощью которого часть СВЧ-энергии направляется в измерительное плечо, содержащее аттенуатор и секцию с кристаллическим детектором. Волноводный тракт герметизирован, а для предотвращения электрического пробоя внутри волновода он наполнялся элегазом SF_6 при давлении 4 атмосферы. Конец волновода через специально разработанное устройство соединялся с изготовленной из диэлектрического материала (кварц) антенной прямоугольного сечения 9.5×19 mm и длиной 115 mm, на которой создавался поверхностный СВЧ-разряд. Огибающая СВЧ-импульса с выхода детектора регистрировалась на цифровом осциллографе TDS-2014. Форма огибающей была близка к прямоугольной.

Методы диагностики

Общий вид разряда и процесса горения тонких пленок спирта в условиях поверхностного СВЧ-разряда фиксировался при различных значениях длительности и мощности СВЧ-импульсов в двух проекциях (вид сбоку и спереди) с использованием цифрового фотоаппарата D50. При последующем воспроизведении изображений на мониторе компьютера можно было определить размеры области горения и скорость распространения фронта горения.

Для изучения динамики воспламенения жидких углеводородов использовались оптические рефракционные датчики и коллимированный фотоэлектронный умножитель, ФЭУ (см. рис. 2). Оптические рефракционные датчики включают в себя газовые He–Ne-лазеры (2), (3), систему формирования и перемещения в пространстве лазерных лучей (4)–(6), фотоэлектронные умножители (8), (9) с входными регулируемые щелями (7). Работа оптического рефракционного датчика основана на принципе отклонения лазерного луча на скачках плотности нейтрального газа. При юстировке рефракционного датчика предварительно задавалось положение лазерного луча в том месте пространства, где необходимо было зарегистрировать соответствующие газодинамические возмущения. В случае регистрации фронта ударной волны входная щель фотоэлектронного умножителя настраивалась в таком положении, чтобы лазерный луч при прохождении в невозмущенном воздухе не фиксировался ФЭУ, однако проходящий через данную точку пространства скачок плотности газа отклонял бы лазерный луч так, чтобы он попадал через входную щель на катод фотоэлектронного умножителя. При регистрации каверны датчик настраивался таким образом чтобы, пройдя через невозмущенное пространство лазерный луч попадал на фотокатод. При прохождении каверны

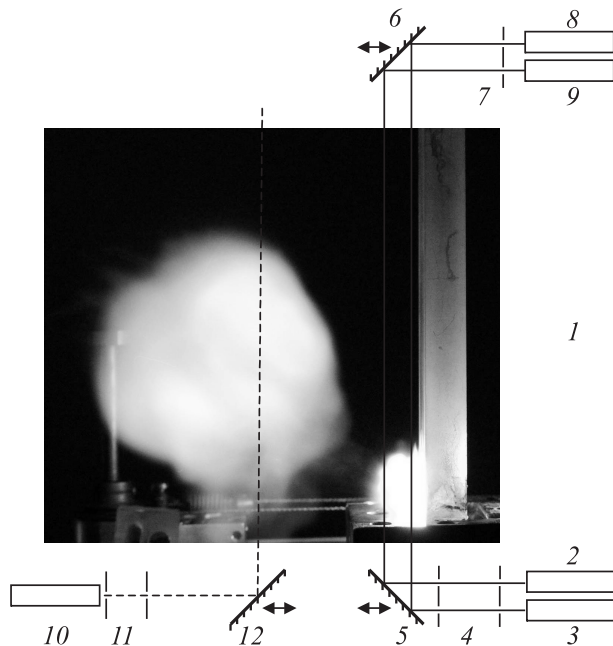


Рис. 2. Блок-схема измерений скорости распространения светящейся области и области с пониженной плотностью газа, возникающих при воспламенении жидких углеводородов с помощью поверхностного СВЧ-разряда: 1 — исследуемый объект (вид сбоку); 2, 3 — He–Ne-лазеры; 4 — блок выходных диафрагм; 5, 6, 12 — зеркала; 7 — блок входных диафрагм; 8, 9, 10 — фотоэлектронные умножители; 11 — коллиimator.

луч отклонялся от первоначального положения, и сигнал на выходе датчика уменьшался. Коллимированный фотоэлектронный умножитель (10), (11) регистрировал излучение из заранее заданной малой (порядка 1–2 mm) области пространства. Зеркало (12) могло перемещаться, что позволяло проводить измерения на различных расстояниях от поверхности антенны.

Для визуализации ударных волн и газодинамических возмущений, возникающих при воспламенении жидких углеводородных пленок в области существования поверхностного СВЧ-разряда в воздухе, использовалась импульсная теневая установка (рис. 3). В качестве источника света для теневой установки использовалась лампа вспышки с длительностью импульса $\tau = 4 \mu s$, что позволяло получать теневые фотографии исследуемого процесса с временным разрешением. Оптическая систе-

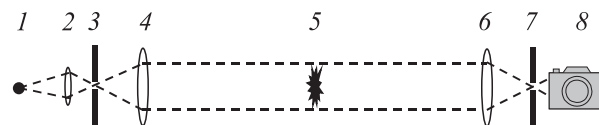


Рис. 3. Блок-схема теневой установки: 1 — импульсная лампа вспышки, 2 — линза, 3 — входная диафрагма, 4 — объектив, 5 — исследуемый неоднородный объект, 6 — линза, 7 — выходная диафрагма, 8 — фотоаппарат.

ма теневой установки позволяла формировать параллельный пучок света диаметром 150 mm с однородным распределением интенсивности света по сечению пучка. С помощью теневой установки изучался процесс воспламенения жидких углеводородных пленок, определялись положение и скорость распространения ударных волн, возникающих при создании поверхностного СВЧ-разряда в воздухе, скорость распространения фронта горения углеводородных пленок, а также положение, размеры и скорость распространения областей с пониженной плотностью газа.

Изменение тепловых потоков, идущих от антенны, на которой создается поверхностный СВЧ-разряд, приводящий к воспламенению жидких углеводородных пленок, регистрировалось с помощью термопары. Длительность СВЧ-импульса в экспериментах не превышала 100 μ s. При воспламенении углеводородных пленок происходит резкое выделение тепловой энергии. Однако получить с микросекундным разрешением с помощью стандартной термопары ее отклик на импульсное тепловое воздействие длительностью 100 μ s не представляется возможным.

Предварительно была проведена калибровка термопары на импульсное включение теплового источника, длительность которого могла изменяться от 1 до 10 s. Оказалось, что выходной сигнал термопары нарастает до стационарного установившегося значения в течение нескольких секунд от начала включения теплового источника, а после его выключения медленно в течение нескольких десятков секунд возвращается в исходное состояние. Исходя из этого был выбран режим работы СВЧ-генератора, оптимальный для измерения с помощью термопары, а именно использовался импульсно-периодический режим воздействия с частотой следования СВЧ-импульсов 10 Hz. В этом случае за время 0.1 s паузы между импульсами тепловое состояние термопары существенно не изменяется, а каждый следующий СВЧ-импульс приводит к возрастанию выходного сигнала от термопары.

Экспериментальные результаты

В настоящей работе подробно исследуется динамика воспламенения тонких пленок спирта, наносимых кисточкой на поверхность вертикально расположенной кварцевой антенны, на которой создается поверхностный СВЧ-разряд в воздухе атмосферного давления $p = 760$ Torr при изменении импульсной СВЧ-мощности от 20 до 75 kW и длительности воздействия от 5 до 100 μ s.

В качестве примера на рис. 2 представлена интегральная фотография процесса воспламенения и горения чистого спирта в условиях поверхностного СВЧ-разряда. Спирт нанесен тонким слоем только на левую поверхность вертикально расположенной кварцевой антенны. Можно видеть, что вблизи поверхности антен-

ны наблюдается плазменно-стимулированное в условиях поверхностного СВЧ-разряда воспламенение тонкой пленки спирта и его интенсивное горение при наличии сильного приведенного электрического поля (яркое белое свечение слева у поверхности антенны, которое фиксируется в течение времени подвода СВЧ-энергии). При этом никакого видимого свечения не наблюдается на расстоянии $y = 1-2$ cm от поверхности антенны. Так как время экспозиции кадра $t = 2$ s, то на этой же фотографии можно видеть также компактное светящееся образование, возникающее на некотором расстоянии $y > 2$ cm от поверхности антенны. Экспериментально было зафиксировано, что с помощью поверхностного СВЧ-разряда, создаваемого при атмосферном давлении воздуха, легко можно воспламенять также тонкие пленки бензина, керосина, масла, воды и раствора спирта в воде в различных концентрациях.

Для понимания процесса развития во времени воспламенения тонких пленок спирта с помощью поверхностного СВЧ-разряда были получены пространственно-временные зависимости интенсивности свечения пламени.

С этой целью с помощью коллимированного фотоэлектронного умножителя регистрировались интенсивности свечения из заданных областей пространства, расположенных на различных расстояниях от поверхности антенны.

Так, на рис. 4 представлен временной ход интенсивности свечения, зафиксированный вблизи поверхности кварцевой антенны из области пространства с координатами $y = 5$ mm (y — поперечная координата — расстояние от поверхности антенны), $z = 10$ mm (z — продольная координата — расстояние вдоль антенны, отсчитываемое от конца подводящего СВЧ-мощность к кварцевой антенне металлического волновода). Видно, что в первые 40 μ s после начала воздействия наблюдается слабое свечение, соответствующее поверхностно-

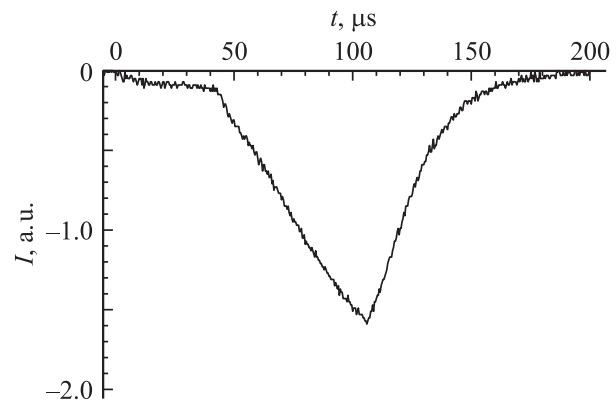


Рис. 4. Временной ход интенсивности свечения, зарегистрированный вблизи ($y = 5$ mm) поверхности кварцевой антенны коллимированным фотоэлектронным умножителем, при воспламенении тонкой пленки спирта с помощью поверхностного СВЧ-разряда при $p = 1$ atm, импульсной СВЧ-мощности $W = 40$ kW, длительности импульса $\tau = 105$ μ s.

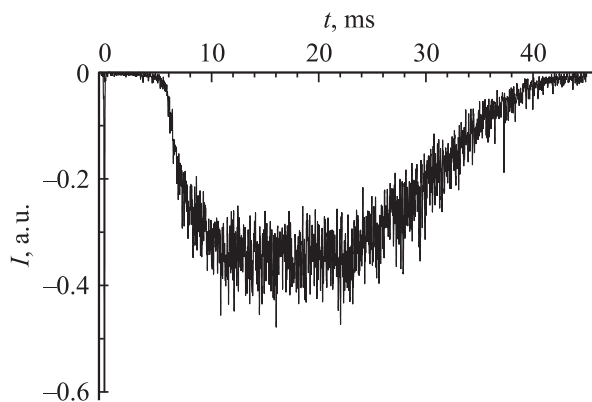


Рис. 5. Сигнал с коллимированного фотоэлектронного умножителя, зарегистрированный в области пространства с координатами $y = 35$ mm и $z = 20$ mm при горении спирта в воздухе в условиях поверхностного СВЧ-разряда при $p = 1$ atm, $\tau = 100$ μ s, $W = 55$ kW.

му СВЧ-разряду. Выделяемой за это время в спирте СВЧ-энергии, равной 1.6 J, достаточно для нагрева до температуры кипения 351 K и перевода в газообразное состояние 1.5 mg спирта, что соответствует толщине пленки спирта порядка 15 μ с площадью 1 cm².

Из рис. 4 видно также, что спустя приблизительно 40 μ s от начала воздействия интенсивность свечения начинает возрастать и к концу СВЧ-импульса (для условий данного эксперимента $W = 40$ kW) в 16 раз превышает интенсивность свечения в начале импульса. Приблизительно линейное возрастание свечения связано с плазменно-стимулированным неравновесным воспламенением спирта вблизи антенны в условиях поверхностного СВЧ-разряда. Из осциллограммы рис. 4 также видно, что приблизительно через 100 μ s после окончания СВЧ-импульса интенсивность свечения падает практически до нуля.

Однако на этом процесс не заканчивается. На рис. 5 представлен временной ход интенсивности свечения, зафиксированный из области пространства с координатами $y = 35$ mm, $z = 10$ mm. При этом зарегистрированное в течение первых 100–200 μ s свечение связано с попаданием на фотокатод коллимированного ФЭУ рассеянного света от области плазменно-стимулированного горения спирта в условиях поверхностного СВЧ-разряда при больших значениях приведенного электрического поля. Нарастание свечения спустя приблизительно 6 ms после окончания СВЧ-импульса связано с процессом автовоспламенения и догорания мелких жидких капелек, инжектируемых из зоны горения спирта у поверхности антенны, а также паров и газообразных продуктов деструкции спирта, формируемых в условиях поверхностного СВЧ-разряда.

Из представленных на рис. 4 и 5 результатов можно сделать вывод о том, что в условиях проведенного эксперимента ($W = 40$ kW) период индукции плазменно-

стимулированного воспламенения тонкой пленки спирта с помощью поверхностного СВЧ-разряда равен 43 μ s, тогда как период индукции автовоспламенения паров спирта в этих условиях на два порядка больше и равен несколько миллисекунд. Аналогичные результаты, полученные при других значениях импульсной СВЧ-мощности, показывают, что задержка плазменно-стимулированного нетеплового воспламенения тонкой пленки спирта уменьшается от 100 до 10 μ s при увеличении подводимой к антенне импульсной СВЧ-мощности от 20 до 75 kW.

Для подтверждения того факта, что в условиях поверхностного СВЧ-разряда происходит воспламенение и сгорание жидких углеводородных пленок, а не просто разряд в парах спирта, с помощью термопары были измерены тепловые потоки, идущие от поверхностного СВЧ-разряда в воздухе и от пламени при горении спирта. Экспериментальные исследования проводились при расположении термопары на различных расстояниях от поверхности антенны ($y = 1$ –40 mm). Для увеличения отношения сигнал–шум измерения проводились в условиях импульсно-периодического режима создания поверхностного СВЧ-разряда. В каждом случае реализовывалось $N = 50$ импульсов, следующих с частотой повторения 10 Hz. Было получено, что в зависимости от расстояния до поверхности антенны потоки тепла, выделяемые при воспламенении пленки спирта, в 10–30 раз больше потоков, достигающих термопары от плазмы поверхностного СВЧ-разряда в воздухе. Следует отметить, что при полном сгорании 1.5 mg спирта должна выделиться тепловая энергия 44 J, что в 27.5 раз больше подводимой СВЧ-энергии.

В качестве примера на рис. 6 представлено сравнение временных зависимостей откликов термопары, расположенной на расстоянии $y = 10$ mm от поверхности антенны, в условиях плазмы импульсно-периодического

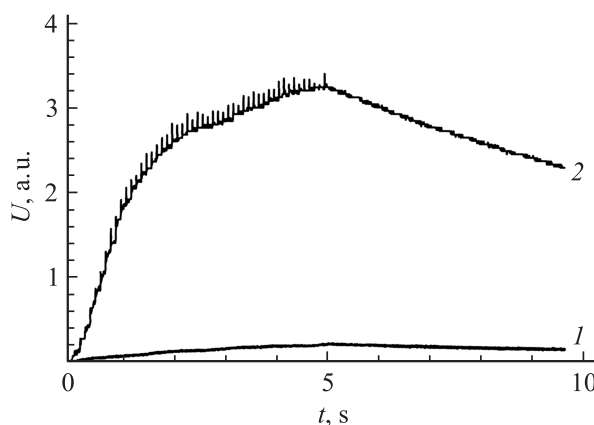


Рис. 6. Временные зависимости сигналов от термопары в условиях импульсно-периодического поверхностного СВЧ-разряда в воздухе (1) и при горении спирта (2), зарегистрированные на расстоянии $y = 20$ mm от поверхности антенны $p = 1$ atm, $z = 15$ mm, $\tau = 100$ μ s, $W = 55$ kW, частота следования импульсов $f = 10$ Hz, число СВЧ-импульсов $N = 50$.

поверхностного СВЧ-разряда в воздухе и от пламени при горении спирта в воздухе. Количество теплоты численно пропорционально величине площади под кривой зависимости отклика термопары от времени. По данным рис. 6 было вычислено, что на расстоянии $y = 10 \text{ mm}$ от поверхности антенны тепловой поток при воспламенении спирта в 26.6 раза превышает тепловой поток от поверхностного СВЧ-разряда в воздухе, что хорошо согласуется с приведенными выше оценками. Следует также отметить, что при воспламенении тонких пленок спирта выделяется количество теплоты, во много раз превышающее то количество, которое может быть реализовано при полной трансформации подводимой СВЧ-энергии в тепловую энергию. Это также указывает на то, что в условиях эксперимента происходит воспламенение и сгорание спирта.

Была исследована также динамика процесса воспламенения тонких пленок спирта в условиях поверхностного СВЧ-разряда в воздухе атмосферного давления. Для этого фиксировался общий вид процесса воспламенения при различных длительностях СВЧ-импульса, и измерялись поперечные размеры, достигаемые областью интенсивного горения спирта при этих условиях. По полученным результатам была определена скорость распространения передней границы области интенсивного горения спирта в условиях низкотемпературной плазмы самостоятельного поверхностного СВЧ-разряда. Такие измерения проводились при варьировании подводимой к антенне СВЧ-мощности в пределах 20–75 kW.

На рис. 7 представлены данные о положении и скорости передней границы области плазменно-стимулированного горения спирта в воздухе в условиях поверхностного СВЧ-разряда при подводимой импульсной СВЧ-мощности $W = 55 \text{ kW}$. Видно, что при этой мощности период индукции для воспламенения спирта равен приблизительно $20 \mu\text{s}$. Использование СВЧ-импульсов с длительностью меньше $20 \mu\text{s}$ при импульсной мощно-

сти 55 kW не приводит к плазменно-стимулированному горению. С увеличением длительности импульса больше $20 \mu\text{s}$ поперечные размеры области интенсивного горения спирта возрастают, достигая при $\tau = 100 \mu\text{s}$ величины 10–15 mm.

Следует подчеркнуть, что в условиях поверхностного СВЧ-разряда воздух нагревается за 10–20 μs приблизительно до 1000 K [27]. 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 сверхзвукового пропан-воздушного потока с помощью поверхностного СВЧ-разряда [9–15]. При этом скорость распространения передней границы области интенсивного горения вблизи поверхности антенны при наличии сильного электрического поля достигает 300 m/s, с увеличением расстояния от поверхности антенны скорость уменьшается и на расстоянии $y = 10 \text{ mm}$ падает до 100 m/s, что значительно (на несколько порядков) 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 (высокий уровень степени ионизации, большое количество возбужденных частиц и активных радикалов, быстрый нагрев газа), влиянием собственного ультрафиолетового излучения, генерируемого в плазме используемого 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, а также связанное с расширением продуктов горения спирта вблизи антенны.

Для визуализации ударных волн и газодинамических возмущений, возникающих при воспламенении тонких пленок спирта, использовалась импульсная теневая установка. Теневые фотографии регистрировались при различных временных задержках импульса лампы вспышки по отношению к переднему фронту СВЧ-импульса. Такие измерения позволили получить временные зависимости положения фронта ударной волны, а также исследовать динамику газодинамических возмущений в окрестности диэлектрической антенны, на поверхности которой воспламеняется спирт в условиях поверхностного СВЧ-разряда при атмосферном давлении воздуха $p = 1 \text{ atm}$ (см. рис. 8, где представлены только кадры, которые необходимы для понимания исследуемого процесса).

Эксперименты показали, что при включении СВЧ-энергии в зоне энерговклада формируется ударная вол-

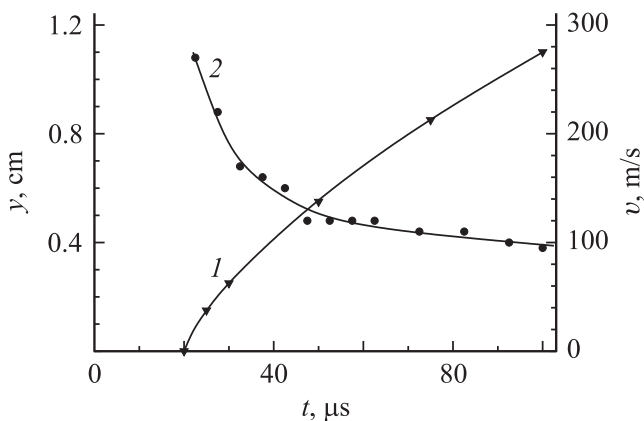


Рис. 7. Положение (кривая 1) и скорость (кривая 2) передней границы области интенсивного горения спирта в воздухе в условиях поверхностного СВЧ-разряда при $p = 1 \text{ atm}$, $W = 55 \text{ kW}$, $\tau = 100 \mu\text{s}$, $z = 10 \text{ mm}$.

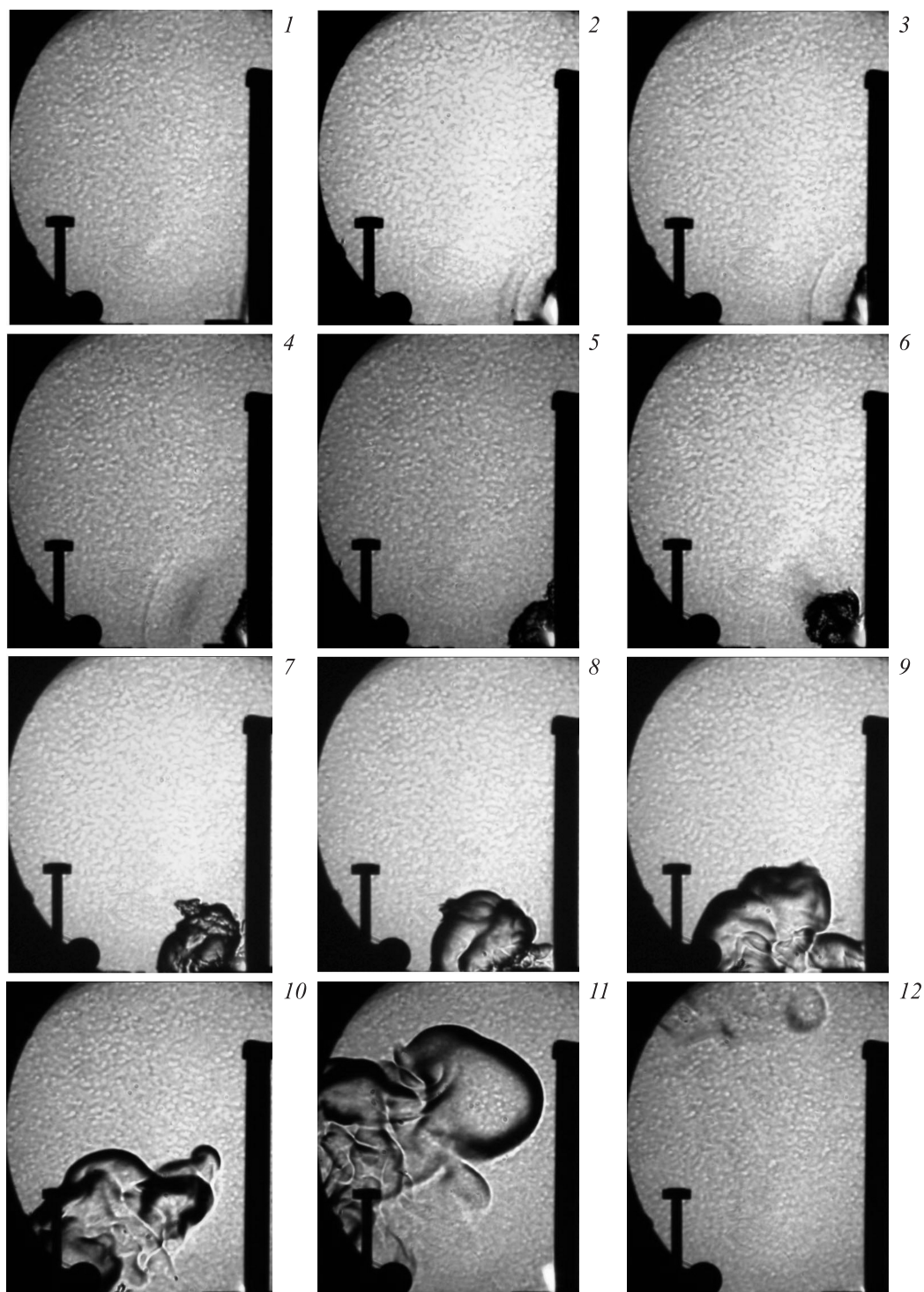


Рис. 8. Динамика возникновения и распада области с пониженной плотностью газа при горении спирта, воспламеняемого поверхностным СВЧ-разрядом при $p = 1 \text{ atm}$, $W = 55 \text{ kW}$, $\tau = 100 \mu\text{s}$. Время экспозиции одного кадра $4 \mu\text{s}$, момент регистрации t , ms: 1 — 0.05; 2 — 0.07; 3 — 0.09; 4 — 0.15; 5 — 0.4; 6 — 0.8; 7 — 3; 8 — 10; 9 — 30; 10 — 100; 11 — 200; 12 — 400.

на, ее скорость максимальна вблизи поверхности антенны и постепенно падает до 450 m/s . Ударная волна двигаясь в горизонтальном направлении влево от вертикально расположенной антенны, вовлекает также в движение в этом направлении и нагретый нейтральный газ.

К моменту времени $t = 300 \mu\text{s}$ ударная волна уходит из поля зрения теневой установки.

Результаты теневого фотографирования показывают также, что после воспламенения на поверхности антенны спирта и, как следствие этого — повышения

температуры газа, в этой зоне начинает формироваться также область с деформированной из-за горения спирта плотностью газа. Видно, что область нагретого газа с пониженной плотностью представляет собой некоторую турбулентную неоднородную зону с резкими градиентами плотности на внешних границах. Следует заметить, что зафиксированное движение каверны определяется состоянием газа, приводимого в движение за фронтом ударной волной, а также связано с расширением продуктов горения спирта. С использованием формул, приведенных в [30], были рассчитаны зависимости скачков давления, плотности и температуры газа, а также значения абсолютной скорости газа за ударной волной от скорости ударной волны. В наших условиях абсолютная скорость, которую приобретает газ в следе за ударной волной, изменяется от $v_g \sim 300$ m/s при скорости ударной волны $v \sim 600$ m/s до $v_g \sim 100$ m/s при $v \sim 450$ m/s.

Каверна должна бы двигаться из-за конвективных потоков вверх, однако, так как отходящая от антенны ударная волна приводит в движение газ в горизонтальном направлении, то и каверна вслед за фронтом ударной волны движется вначале в горизонтальном направлении, достигая через 100 ms от начала воспламенения точек пространства, расположенных на расстоянии $y = 100$ mm от поверхности антенны и из-за интенсивных конвективных тепловых потоков начинает всплывать вверх. К моменту времени $t = 500$ ms от начала воздействия в окрестности антенны восстанавливается однородное распределение плотности воздуха. Если СВЧ-разряд создается внутри спирта, налитого в углубление на фланце, и внешнего воспламенения спирта не происходит, то выделяемая внутри жидкости энергия переходит в направленное движение либо мелких капелек, либо наблюдаются струйки жидкости, летящие со скоростью порядка 10 m/s.

Для регистрации эволюции газодинамических возмущений использовались также лазерные рефракционные датчики, работающие на принципе отклонения лазерного луча на скачках плотности нейтрального газа. При перемещении положения лазерного луча в направлении, перпендикулярном поверхности антенны, были зарегистрированы моменты времени прихода скачка плотности в фиксированные точки пространства. На рис. 9 представлена временная зависимость сигнала, зафиксированного с помощью лазерного рефракционного датчика, расположенного на расстоянии $y = 20$ mm от поверхности антенны и регистрирующего процесс возникновения, развития и распада зоны с пониженной плотностью газа (каверны) в условиях воспламенения тонкой пленки спирта с помощью поверхностного СВЧ-разряда. Можно видеть, что зона с пониженной плотностью газа достигает положения лазерного луча через $t \sim 1.5$ ms и существует в этой области пространства в течение приблизительно 50 ms. Время возникновения и существования зоны с пониженной плотностью газа увеличивается для областей пространства, расположенных дальше от антенны, так, при $y = 50$ mm время воз-

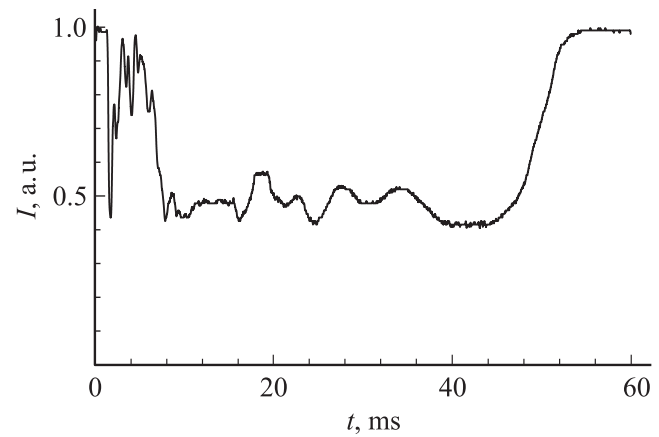


Рис. 9. Временной ход сигнала от лазерного рефракционного датчика, расположенного на расстоянии $y = 20$ mm от поверхности антенны, при воспламенении тонкой пленки спирта с помощью поверхностного СВЧ-разряда.

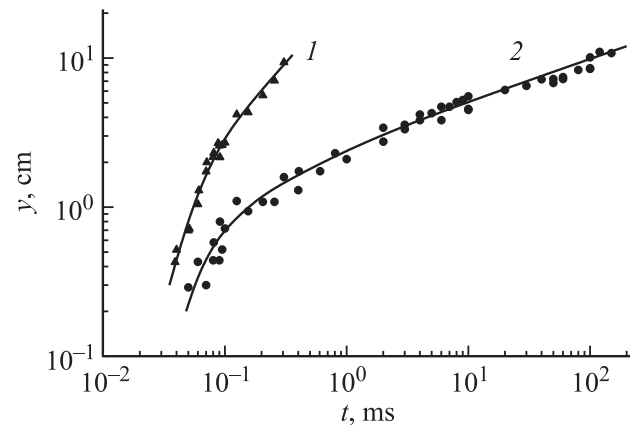


Рис. 10. Временные зависимости положения фронта ударной волны (1) и передней границы области с пониженной плотностью газа (2), полученные в условиях воспламенения тонкой пленки спирта с помощью поверхностного СВЧ-разряда в воздухе при $p = 1$ atm, $W = 55$ kW, $\tau = 100$ μ s.

никновения $t = 10$ ms, а время существования каверны $t = 90$ ms.

На рис. 10 в двойном логарифмическом масштабе представлены временные зависимости положения фронта ударной волны и передней границы области с пониженной плотностью газа, возникающие при воспламенении с помощью поверхностного СВЧ-разряда тонкой пленки спирта. Видно, что ударная волна, быстро уходя от антенны, намного опережает каверну. Так, расстояние в 100 mm ударная волна проходит приблизительно за 200 μ s, тогда как каверне, для того чтобы прийти в эту область пространства, необходимо в тысячу раз большее время.

Скорость распространения передней границы области с пониженной плотностью газа на поздней стадии горения спирта представлена на рис. 11. Можно видеть,

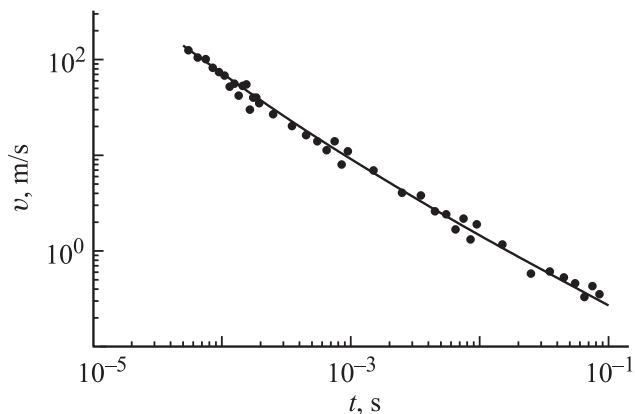


Рис. 11. Зависимость от времени скорости движения передней границы области с пониженной плотностью газа, возникающей в условиях воспламенения тонкой пленки спирта с помощью поверхностного СВЧ-разряда в воздухе при $p = 1 \text{ atm}$, $W = 55 \text{ kW}$, $\tau = 100 \mu\text{s}$.

что скорость распространения каверны равна 100 m/s вблизи ($y = 10 \text{ mm}$) антенны и уменьшается до десятков сантиметров в секунду на поздних стадиях (через $t = 0.1 \text{ s}$ после включения разряда и больших расстояниях от поверхности антенны $y = 100 \text{ mm}$). Использование коллимированных фотоэлектронных умножителей, регистрирующих сигналы свечения на различных расстояниях от антенны при горении спирта в воздухе в условиях поверхностного СВЧ-разряда, подтверждает наличие светящегося образования и позволяет также определить скорость его распространения, которая с очень хорошей степенью точности совпадает с измеренной с помощью рефракционного датчика и теневого метода.

Заключение

В условиях поверхностного СВЧ-разряда в неподвижном воздухе при атмосферном давлении реализовано быстрое нетепловое плазменно-стимулированное воспламенение тонких пленок спирта. Показано, что время задержки воспламенения составляет $10\text{--}100 \mu\text{s}$, уменьшаясь с увеличением подводимой мощности, а вблизи поверхности антенны передняя граница области интенсивного горения распространяется с большой скоростью, приближаясь к скорости звука в воздухе при нормальных условиях. Такой малый период индукции и экстремально высокое значение скорости распространения горения указывают на перспективность использования поверхностного СВЧ-разряда в сверхзвуковой плазменной аэродинамике.

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

Список литературы

- [1] *The International Workshop on Weakly Ionized Gases*. American Institute of Aeronautics and Astronautics. USA, Colorado — 1997; Norfolk — 1998, 1999, Anaheim — 2001, Reno — 2002, 2003, 2004, 2005, 2006, 2007, 2008.
- [2] *The International Workshop on Magneto- and Plasma Aerodynamics for Aerospace Applications*. High Temperature Institute of RAS. Russia, Moscow, 1999, 2000, 2001, 2002, 2003, 2005, 2007.
- [3] *The International Workshop "Thermochemical and plasma processes in aerodynamics"*. Hypersonic Systems Research Institute, LENINETZ Holding Company. Russia, St.-Peterburg, 2003, 2004, 2006.
- [4] Зацепин Д.В., Стариковская С.М., Стариковский А.Ю. // Химическая физика. 2001. Т. 20. № 7. С. 66.
- [5] Boshenkov S.A., Starikovskaya S.M., Starikovskii A.Yu. // Combust. Flame. 2003. Vol. 133. N 1–2. P. 133.
- [6] Константиновский Р.С., Шибков В.М., Шибкова Л.В. // Кинетика и катализ. 2005. Т. 46. № 6. С. 821.
- [7] Кочетов И.В., Напартович А.П., Леонов С.Б. // Химия высоких энергий. 2006. Т. 40. № 2. С. 1.
- [8] Попов Н.А. // Физика Плазмы. 2008. Т. 34. № 5. С. 414.
- [9] Шибков В.М., Александров А.Ф., Ершов А.П. и др. // Физика плазмы. 2005. Т. 31. № 9. С. 857.
- [10] Шибков В.М., Александров А.Ф., Ершов А.П. и др. // Вестн. Московского университета. Сер. 3. Физика, астрономия. 2004. № 5. С. 67.
- [11] Shibkov V.M., Abramova A.D., Chernikov A.V. et al. // Proc. 42nd Aerospace Sci. Meeting and Exhibit. Reno, Nevada, USA. American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2004. AIAA-2004-0513. P. 1–11.
- [12] Shibkov V.M., Chernikov A.V., Ershov A.P. et al. // Proc. XI Int. Conf. on magnetohydro-dynamics energy conversion and the VI Int. Workshop on magnetoplasma aerodynamics. Moscow: Institute of high temperatures of RAS, 2005. Vol. 3. P. 711.
- [13] Shibkov V.M., Alexandrov A.F., Chernikov A.V. et al. // Proc. 5th Workshop "Thermochemical and plasma processes in aerodynamics". St.-Petersburg, 2006. N 25. P. 1.
- [14] Shibkov V.M., Karachev A.A., Konstantinovskij R.S. et al. // Strong Microwaves in Plasmas / Ed. by A.G. Litvak. Nizhny Novgorod: Applied Physics of the RAS, 2006. Vol. 2. P. 686.
- [15] Shibkov V.M., Aleksandrov A.F., Chernikov A.V. et al. // Proc. 45th AIAA Aerospace Sci. Meet. and Exhibit. Reno, Nevada, USA. American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2007. AIAA-2007-427.
- [16] Шибков В.М., Виноградов Д.А., Восканян А.В. и др. // Вестн. Московского университета. Сер. 3. Физика, астрономия. 2000. Т. 41. № 6. С. 64.
- [17] Шибков В.М., Ершов А.П., Черников В.А., Шибкова Л.В. // ЖТФ. 2005. Т. 75. Вып. 4. С. 67.
- [18] Шибков В.М., Двинин С.А., Ершов А.П., Шибкова Л.В. // ЖТФ. 2005. Т. 75. Вып. 4. С. 74.
- [19] Двинин С.А., Шибков В.М., Михеев В.В. // Физика плазмы. 2006. Т. 32. № 7. С. 654.
- [20] Шибков В.М., Двинин С.А., Ершов А.П. и др. // Физика плазмы. 2007. Т. 33. № 1. С. 77.
- [21] Шибкова Л.В. Воспламенение спирта в условиях поверхностного СВЧ-разряда в воздухе. Препринт № 4. М.: МГУ, 2007. 21 с.

- [22] *Шибкова Л.В.* Физические процессы в движущейся плазме многокомпонентных инертных и химически активных смесей. Дисс. д.ф.-м.н. Объединенный институт высоких температур РАН. 2007. 367 с.
- [23] *Шибкова Л.В.* // Вестн. Московского университета. Сер. 3. Физика, астрономия. 2007. № 5. С. 62.
- [24] *Александров А.Ф., Шибков В.М., Шибкова Л.В.* // Вестн. Московского университета. Сер. 3. Физика, астрономия. 2008. № 5. С. 68.
- [25] *Александров А.Ф., Шибков В.М., Шибкова Л.В.* // Вестн. Московского университета. Сер. 3. Физика, астрономия. 2008. № 6. С. 65.
- [26] *Шибков В.М., Шибкова Л.В.* // Теплофизика высоких температур. 2009. Т. 47. № 5.
- [27] *Александров А.Ф., Шибков В.М., Шибкова Л.В.* // Теплофизика высоких температур. 2009. Т. 47. № 6.
- [28] *Батанов Г.М., Грицинин С.И., Косый И.А.*, и др. // Тр. Физического института им. П.Н. Лебедева АН СССР, 1985. Т. 160. С. 174.
- [29] *Александров К.В., Грачев Д.П., Есаков И.И., Ходатаев К.В.* // ЖТФ. 2002. Т. 72. Вып. 7.
- [30] *Абрамович Г.Н.* Прикладная газовая динамика. М.: Наука, 1991.