

ХИМИЧЕСКАЯ ФИЗИКА, ФИЗИЧЕСКАЯ КИНЕТИКА И ФИЗИКА ПЛАЗМЫ

Воспламенение тонких жидких углеводородных пленок с помощью поверхностного СВЧ-разряда, создаваемого в режиме парных импульсовВ. М. Шибков^а, Л. В. Шибкова, П. В. Копыл, О. С. Сурконт

*Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, физический факультет,
кафедра физической электроники. Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2.
E-mail: ^а shibkov@phys.msu.ru*

Статья поступила 07.11.2011, подписана в печать 16.02.2012.

Исследован процесс воспламенения и горения жидких углеводородных пленок в условиях самостоятельного поверхностного СВЧ-разряда в неподвижном воздухе, создаваемого на диэлектрической антенне в режиме парных импульсов. Показано влияние предварительного возбуждения среды, осуществляемого в течение первого импульса, на период индукции и интенсивность горения углеводородов в течение второго СВЧ-импульса.

Ключевые слова: низкотемпературная плазма, поверхностный СВЧ-разряд, воспламенение и горение углеводородного топлива.

УДК: 533.9. PACS: 52.80.-s, 52.70.-m, 52.77.-j, 52.50.Sw, 82.33.Xj, 82.33.Vx.

Поиск методов осуществления быстрого воспламенения углеводородных химически активных смесей является актуальной проблемой, особенно с точки зрения новой области физики, а именно, плазменной сверхзвуковой аэродинамики, где одной из главных задач является максимальное сокращение периода индукции для воспламенения высокоскоростных потоков воздушно-углеводородных смесей. Разработано множество способов воздействий, приводящих к развитию разветвленно-цепных реакций при горении углеводородов. Одним из перспективных направлений является газовый разряд, так как с помощью низкотемпературной неравновесной плазмы имеется возможность осуществить интенсификацию разветвленно-цепных реакций при достаточно низкой газовой температуре. В этой области плазменной аэродинамики исследования проводятся как в России, так и за рубежом. Однако кинетика воспламенения в условиях низкотемпературной плазмы газового разряда при высоких значениях приведенного электрического поля остается не до конца ясной.

В статье приводятся результаты, полученные при реализации быстрого нетеплового плазменно-стимулированного воспламенения тонких жидких углеводородных пленок в условиях поверхностного СВЧ-разряда, создаваемого в режиме парных импульсов, что моделирует режим программированного СВЧ-разряда [1]. Эксперименты проводились на установке, состоящей из магнетронного генератора, системы для подвода СВЧ-энергии к диэлектрической антенне, на поверхности которой создавался СВЧ-разряд, блока синхронизации и диагностической системы. Подробное описание установки приведено в работе [2]. В качестве источника СВЧ-излучения использовался импульсный магнетронный генератор сантиметрового диапазона длин волн с параметрами: длина волны $\lambda = 2.4$ см; отдаваемая в тракт импульсная мощность $W < 100$ кВт; длительность импульсов $\tau = 5-200$ мкс; частота повторения импульсов $f = 1-100$ Гц, скважность в режиме повторяющихся

импульсов $Q = 1000$; при этом средняя мощность не превышала 100 Вт. Микроволновая энергия подводится к разрядной камере с помощью волноводного тракта прямоугольного сечения 9.5×19 мм². Блок синхронизации позволял независимо изменять длительности первого и второго импульсов, частоту их следования, а также временную задержку второго импульса относительно первого при одинаковых значениях мощности. Общий вид разряда и процесс воспламенения и горения тонких пленок спирта в условиях поверхностного СВЧ-разряда фиксировался с использованием цифрового фотоаппарата при различных длительностях и мощностях СВЧ-импульсов. Для изучения динамики воспламенения жидких углеводородов использовались оптические рефракционные датчики, коллимированный фотоэлектронный умножитель и двойной зонд. Работа оптического рефракционного датчика основана на принципе отклонения лазерного луча на скачках плотности нейтрального газа. Коллимированный фотоэлектронный умножитель регистрировал излучение из заранее заданной малой (~ 2 мм) области пространства. Изменение тепловых потоков, идущих от антенны, на которой создается поверхностный СВЧ-разряд, приводящий к воспламенению жидких углеводородных пленок, регистрировалось с помощью термопары.

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. Использование кварцевой антенны позволило технологически осуществить ее контакт 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 [3] был легко реализован СВЧ-разряд на поверхности кварцевой антенны при импульсной СВЧ-мощности всего 10–20 кВт и атмосферном давлении воздуха в разрядной камере.

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 мм до 1 мм в зависимости от длительности воздействия, давления газа и подводимой СВЧ-мощности [4]. Разрядные каналы вытягиваются в основном вдоль антенны по направлению распространения электромагнитной энергии. 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 до температуры ~ 1000 К, поэтому формирование разряда сопровождается генерацией ударных волн, скорость распространения которых вблизи антенны достигает 1 км/с.

В целях повышения эффективности процесса воспламенения углеводородных топлив в нашей лаборатории был предложен способ инициации горения с помощью парных СВЧ-импульсов. Применительно к воспламенению неподвижных воздушно-углеводородных смесей в течение первого импульса может происходить реформирование углеводородного топлива (наработка заряженных и возбужденных частиц, активных радикалов, а также подогрев топлива), что должно привести к снижению времени задержки воспламенения в течение второго импульса и увеличению полноты сгорания. Что касается воспламенения высокоскоростных воздушно-углеводородных потоков, то режим парных импульсов может использоваться в такой комбинации, когда разряд в течение первого импульса создается перед входом в основную камеру сгорания, где происходит подготовка топлива, тогда как в течение повторного импульса низкотемпературная плазма создается в основной камере сгорания с временной задержкой, определяемой скоростью сноса реформированного топлива и расстоянием между областью предварительного возбуждения топлива и камерой сгорания.

На рис. 1 представлена временная зависимость интенсивности свечения в области плазменно-стимулированного воспламенения при временной задержке $t_{del} = 2$ мс второго импульса относительно первого. Вверху в миллисекундном временном масштабе (верхняя ось времени t и правая ось W и I) представлены огибающие первого $W_1(t)$ и второго $W_2(t)$ СВЧ-импульсов и интенсивности $I_1(t)$ и $I_2(t)$ свечения пламени, инициируемого низкотемпературной плазмой поверхностного СВЧ-разряда, существующего при высоких значениях приведенного электрического поля. Внизу (нижняя ось времени и левая ось W и I) представлены те же данные в микросекундном временном масштабе, при этом интенсивность свечения пламени, возникающего в течение второго СВЧ-импульса, сдвинута по времени на 2 мс. Видно, что период индукции во втором импульсе значительно меньше и составляет примерно 10–20 мкс, а интенсивность свечения в три раза выше по сравнению с первичным воспламенением, что в свою

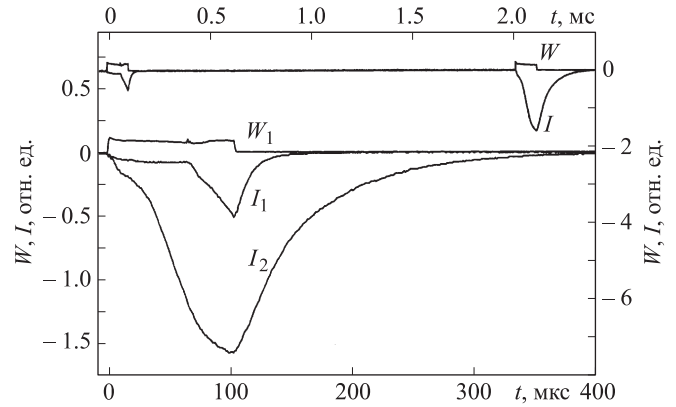


Рис. 1. Временные зависимости интенсивностей свечения в области плазменно-стимулированного воспламенения пленки спирта в условиях поверхностного СВЧ-разряда, создаваемого в режиме парных импульсов при задержке $t_{del} = 2$ мс второго импульса относительно первого

очередь подтверждает эффективность применения режима парных импульсов.

Это может быть связано с тем, что первичное воспламенение происходит в не реформированном и не нагретом жидком углеводороде. Поэтому для воспламенения в течение первого импульса требуется некоторое время для нагрева спирта, его частичного испарения и наработки активных радикалов, а также возбужденных и заряженных частиц, способствующих ускорению цепного механизма воспламенения углеводородного топлива.

Зависимость максимальной интенсивности свечения пламени, достигаемой в течение второго СВЧ-импульса, от его временной задержки t_{del} по отношению переднего фронта первого СВЧ-импульса, представлена на рис. 2 при одинаковых мощностях и длительностях первого и второго импульсов. Видно, что полученная зависимость имеет немонотонный характер с минимумом при $t_{del} = 200$ мкс и максимумом при $t_{del} = 2-5$ мс. Прохождение кривой $I_2(t_{del})$ через минимум можно объяснить тем фактом, что требуется некоторое время,

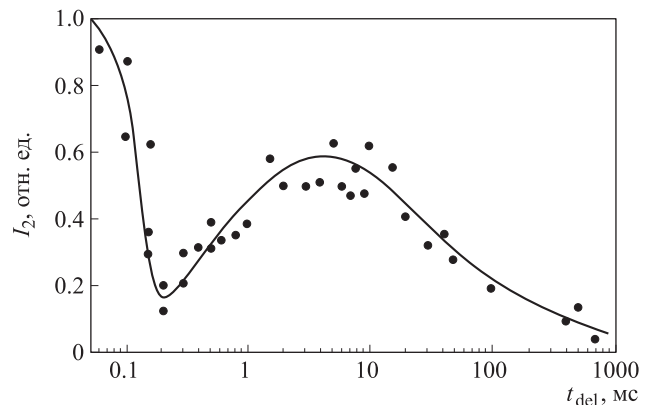


Рис. 2. Интенсивность свечения пламени во время второго импульса в зависимости от его задержки по отношению к переднему фронту первого импульса при одинаковых мощностях $W_1 = W_2 = 55$ кВт и длительностях $\tau_1 = \tau_2 = 50$ мкс первого и второго СВЧ-импульсов

для того чтобы кислород, который расходуется при сгорании спирта в окрестности антенны в течение первого импульса, снова поступил в эту область за счет диффузии из окружающего антенну пространства.

Временной ход интенсивности свечения пламени, которое возникает в условиях повторного СВЧ-разряда, в зависимости от длительности первого импульса при фиксированной длительности и импульсной СВЧ-мощности второго импульса и различных его задержках по отношению к переднему фронту первого импульса представлен на рис. 3. Видно, что при импульсной СВЧ-мощности $W = 55$ кВт и всех задержках второго импульса по отношению к первому импульсу его влияние на повторное воспламенение начинается уже при коротких $\tau_1 = 5-10$ мкс длительностях первого СВЧ-импульса, при этом интенсивность свечения пламени при повторном воздействии вначале увеличивается, достигает максимального значения при $\tau_1 = 30-40$ мкс, а затем медленно уменьшается с ростом длительности первого СВЧ-импульса. При больших длительностях $\tau_1 > 50$ мкс первого импульса в течение первичного воздействия успевает сгореть большое количество жидкого углеводорода, что ведет к уменьшению эффективности горения во время второго импульса.

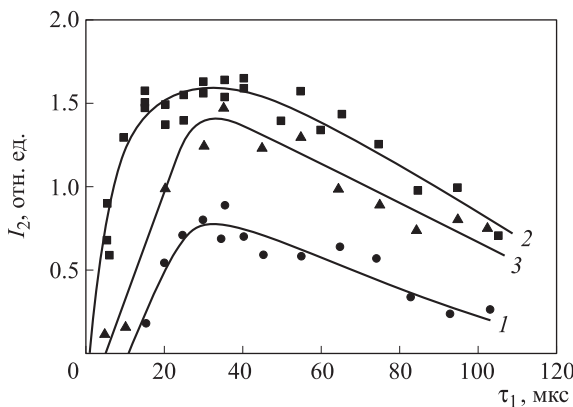


Рис. 3. Интенсивность свечения пламени во время второго импульса в зависимости от длительности первого при $\tau_2 = 50$ мкс, $W_2 = 55$ кВт и различных задержках второго импульса по отношению к переднему фронту первого СВЧ-импульса t_{del} (мс): 1 — 0.5; 2 — 3; 3 — 7

Были также проведены эксперименты по исследованию интенсивности свечения пламени во время второго СВЧ-импульса в зависимости от подводимой мощности. На рис. 4 приведена зависимость интенсивности свечения пламени во время второго СВЧ-импульса от длительности первичного воздействия при фиксированной длительности и задержки второго импульса и различных значениях СВЧ-мощности. Видно, что также как и в предыдущем случае, зависимость интенсивности свечения I_2 от длительности первого импульса имеет немонотонный характер при любых значениях подводимой мощности. С ростом подводимой мощности интенсивность свечения пламени растет. При этом при малых значениях подводимой мощности воспламенение в течение повторного импульса происходит только при длительности первого импульса больше, чем 50 мкс, тогда как при больших значениях подводимой мощно-

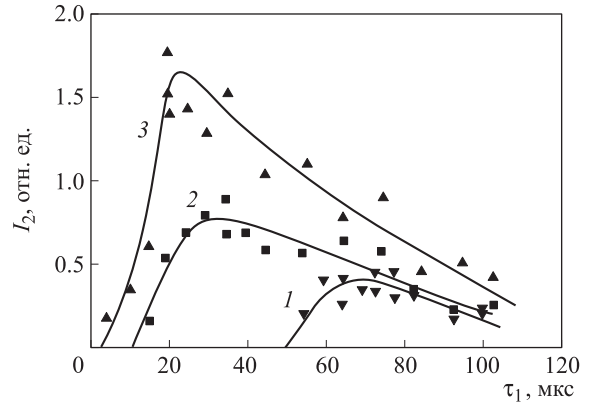


Рис. 4. Интенсивность свечения пламени во время второго СВЧ-импульса в зависимости от длительности первого при длительности второго импульса $\tau_2 = 50$ мкс, его задержки по отношению к переднему фронту первого $t_{del} = 0.5$ мс и различных значениях импульсной мощности W_2 (кВт): 1 — 45; 2 — 55; 3 — 70

сти для воспламенения тонкой пленки спирта в течение повторного воздействия необходим первичный импульс длительностью всего 5 мкс.

Аналогичные результаты были получены при использовании для диагностики повторного воспламенения жидких углеводородных пленок электрического двойного зонда и термопарного метода. В качестве примера на рис. 5 представлен сигнал от термопары, помещенной в область воспламенения спирта на расстоянии $y = 5$ мм от поверхности антенны и $z = 10$ мм от начала антенны, в зависимости от длительности второго импульса при $\tau_1 = 100$ мкс, $W = 55$ кВт, $t_{del} = 3$ мс. Видно, что в этих условиях период индукции при повторном воздействии составляет 10–15 мкс. Увеличение длительности второго импульса от 15 до 40 мкс приводит к резкому (приблизительно в 10 раз) возрастанию теплового потока, фиксируемого термопарой, что связано с воспламенением пленки спирта. Дальнейшее увеличение длительности повторного воздействия приводит лишь к незначительному росту температуры пламени.

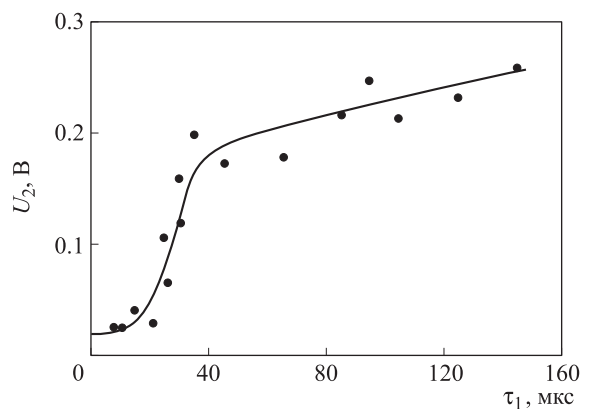


Рис. 5. Сигнал от термопары, помещенной в область воспламенения спирта с координатами $y = 5$ мм, $z = 10$ мм, в зависимости от длительности второго импульса при $\tau_1 = 100$ мкс, $W = 55$ кВт, $t_{del} = 3$ мс

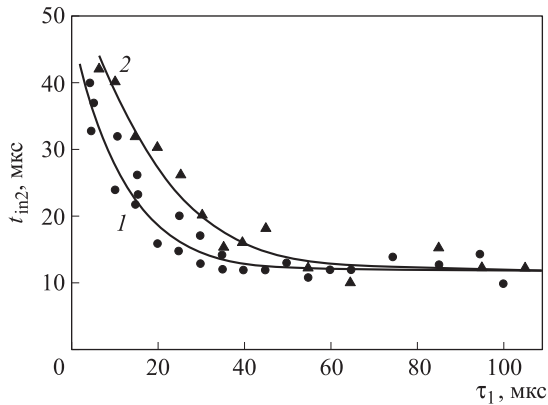


Рис. 6. Периоды индукции во втором импульсе в зависимости от длительности первого при различных задержках второго импульса по отношению к переднему фронту первого импульса t_{del} (мкс): 1 — 3; 2 — 7

На рис. 6 приведены зависимости периодов индукции во втором импульсе от длительности первого импульса при различных задержках второго импульса по отношению к первому. Эти данные получены по измерению временного хода интенсивности свечения во время повторного воздействия. Видно, что период индукции во втором импульсе t_{in2} сильно зависит от длительности первого при любых временных задержках между импульсами. При этом если использовался короткий первый СВЧ-импульс, то период индукции в течение второго импульса практически не отличался от периода индукции в течение первого импульса. По мере увеличения длительности первого СВЧ-импульса период индукции t_{in2} уменьшается и при первичном воздействии длительностью больше 50–80 мкс в зависимости от временного интервала между импульсами период индукции t_{in2} переставал изменяться. Это можно объяснить тем, что в результате действия до-

статочно длительного первого импульса нарабатывает большое число активных частиц и в результате процесс воспламенения под действием второго СВЧ-импульса максимально облегчен и таким образом дальнейшее увеличение длительности первого импульса уже перестает заметно влиять на период индукции повторного импульса.

Проведенные эксперименты показывают, что в условиях поверхностного СВЧ-разряда в неподвижном воздухе при атмосферном давлении период индукции для плазменно-стимулированного воспламенения жидкой пленки спирта во время действия повторного СВЧ-разряда составляет 10–100 мкс, уменьшаясь с увеличением подводимой мощности и увеличением длительности первого СВЧ-импульса. Полученные данные позволяют сделать вывод о возможности применения поверхностного СВЧ-разряда в качестве основного элемента для создания режима программированного воздействия, планируемого к использованию для повышения эффективности инициации процессов воспламенения и увеличения полноты сгорания жидких и газообразных углеводородов в условиях высокоскоростного воздушного потока.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 11-02-01091-а).

Список литературы

1. Зарин А.С., Кузовников А.А., Шибков В.М. // Свободно локализованный СВЧ-разряд в воздухе. М., 1996.
2. Шибков В.М., Двинин С.А., Ершов А.П. и др. // Физика плазмы. 2007. **33**, № 1. С. 77.
3. Шибкова Л.В. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 2007. № 5. С. 62.
4. Шибков В.М., Шибкова Л.В., Карачев А.А. // ТВТ. 2009. **47**, № 5. С. 650.

Thin liquid hydrocarbon films ignition with the help of the surface microwave discharge created in a mode of pair pulses

V. M. Shibkov^a, L. V. Shibkova, P. V. Kopyl, O. S. Surkont

Department of Physical Electronics, Faculty of Physics, M. V. Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia.

E-mail: ^ashibkov@phys.msu.ru.

Process of ignition and combustion of liquid hydrocarbon films in conditions of the self-sustained surface microwave discharge in the motionless air, created on the dielectric antenna in a mode of pair pulses was investigated. Influence of preliminary excitation of the medium which are took place during the first pulse, on the induction period and intensity of combustion of hydrocarbons during the second microwave pulse was shown.

Keywords: low temperature plasma, the surface microwave discharge, ignition and combustion of hydrocarbon fuel.

PACS: 52.80.-s, 52.70.-m, 52.77.-j, 52.50.Sw, 82.33.Xj, 82.33.Vx.

Received 7 November 2011.

English version: *Moscow University Physics Bulletin* 3(2012).

Сведения об авторах

1. Шибков Валерий Михайлович — докт. физ.-мат. наук, профессор; тел.: (495) 939-13-37, (495) 939-25-47, e-mail: shibkov@phys.msu.ru.
2. Шибкова Лидия Владимировна — докт. физ.-мат. наук, доцент; тел.: (495) 939-13-37, e-mail: shibkov@ph-elec.phys.msu.ru.
3. Копыл Павел Владимирович — аспирант; тел.: (495) 939-13-37, e-mail: shibkov@phys.msu.ru.
4. Сурконт Олег Стефанович — мл. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-13-37, e-mail: shibkov@phys.msu.ru.