

ХИМИЧЕСКАЯ ФИЗИКА, ФИЗИЧЕСКАЯ КИНЕТИКА И ФИЗИКА ПЛАЗМЫ

Пространственно-временная эволюция горения в условиях низкотемпературной газоразрядной плазмы жидкого спирта, инжектируемого в воздушный поток

В. М. Шибков, Л. В. Шибкова, А. А. Карачев, П. В. Копыл, О. А. Сурконт

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

Статья поступила 07.07.2011, подписана в печать 30.09.2011

В условиях комбинированного разряда, создаваемого в режиме программированного импульса, реализована стабилизация горения жидкого спирта, инжектируемого в капельной фазе с секундным массовым расходом $dm_2/dt = 0.5-3$ г/с в дозвуковую воздушную струю с секундным массовым расходом $dm_1/dt = 10-100$ г/с, истекающую в затопленное пространство (воздух атмосферного давления).

Ключевые слова: низкотемпературная плазма, высокоскоростной воздушный поток, сверхзвуковая плазменная аэродинамика, горение.

УДК: 533.9. PACS: 52.80.-s, 52.40.Fd, 52.70.-m, 52.50.Dg, 82.33.Xj, 82.33.Vx.

Важнейшей практической задачей, возникающей при оптимизации режима горения воздушно-углеводородных смесей, является поиск новых нетрадиционных способов обеспечения быстрого объемного воспламенения и управления процессом горения углеводородного топлива. Одним из новых решений данной проблемы является использование различного типа газовых разрядов. В настоящее время проводятся интенсивные экспериментальные и теоретические исследования в области интенсификации горения с помощью низкотемпературной газоразрядной плазмы [1–10]. При этом появляется возможность генерации активных частиц в результате диссоциации молекул электронным ударом, электрон-ионных и ион-молекулярных реакций, а также ряда других процессов. Поэтому возможен принципиально нетермический режим горения, когда наработка активных частиц практически на всем протяжении реакции осуществляется электронным ударом [11]. Методы управления горением воздушно-углеводородных потоков, основанные на генерации электрических разрядов, представляются в настоящее время наиболее перспективными. Разнообразие типов электрических разрядов позволяет в широких пределах менять соотношение между вкладом различных механизмов. Применение комбинированных разрядов различного типа может обеспечить необходимую скорость и интенсивность горения.

Для поиска оптимальных способов создания неравновесной плазмы в сверхзвуковом потоке газа в [12] был предложен новый тип сверхвысококачественного разряда, а именно микроволновый разряд, который создается поверхностью волновой на диэлектрическом теле, обтекаемом сверхзвуковым потоком воздуха. В [13, 14] исследованы основные параметры плазмы и свойства разряда на поверхности диэлектрической антенны при средних давлениях воздуха 1 торр $< p < 50$ торр, когда частота столкновений электронов с нейтральными мо-

лекулами порядка круговой частоты электромагнитной энергии. В этих условиях поверхностный СВЧ-разряд в воздухе представляет собой плазменное образование толщиной порядка и меньше 1 мм, равномерно покрывающее поверхность антенны. В начальные моменты времени скорость распространения разряда в зоне его формирования достигает значения 10^7 см/с. Так как напряженность электрического поля в условиях поверхностного СВЧ-разряда велика и поле локализовано в тонком приповерхностном слое, то происходят эффективные диссоциация и нагрев молекулярного газа. Эти факты очень важны с точки зрения уменьшения поверхностного трения при использовании поверхностного СВЧ-разряда для ввода энергии в пограничный слой [8]. В работе [15] было показано, что при низких давлениях воздуха, $p < 1$ торр, когда частота столкновений электронов с нейтральными молекулами много меньше круговой частоты электромагнитной энергии, поверхностный СВЧ-разряд представляет собой однородное большого объема плазменное образование, размеры которого растут с уменьшением давления. Степень ионизации при $p = 10^{-3}$ торр достигает 10% и более. Такой разряд перспективен для разработки новых источников плазмы для целей микро- и наноэлектроники (плазменная обработка поверхности, травление, осаждение пленок и нанесение покрытий для целей нанотехнологий). В работах [8, 16–18] исследован микроволновый разряд, создаваемый поверхностной волной на диэлектрическом теле при высоких, вплоть до атмосферного, давлениях воздуха. Разряд при высоких давлениях 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. Быстрый нагрев газа на стадии формирования разряда приводит к тепловому взрыву вблизи поверхности кварцевой антенны и генерации ударных волн. На поздних стадиях в обла-

сти существования разряда образуется каверна — зона пониженной плотности нейтрального газа. Разряд при повышенных давлениях перспективен для инициации воспламенения сверхзвуковых потоков газообразного [19, 20] и жидкого [21–24] углеводородного топлива. Однако, так же как в условиях других типов газовых разрядов, горение высокоскоростных воздушно-углеводородных потоков в условиях импульсного сверхвысокочастотного разряда прекращается, как только подвод энергии прекращается.

Для поддержания стационарного горения при использовании для воспламенения воздушно-углеводородных смесей низкотемпературной плазмы необходимо оптимизировать режим инициации разряда, т.е. величину вкладываемой в плазму энергии, длительность и частоту следования импульсов. Это можно осуществить при создании разряда в режиме программированного импульса [25]. В этом случае пробой газа и создание плазмы осуществляется с помощью мощного короткого импульса или пачки коротких мощных импульсов, а поддержание плазмы и вклад энергии в плазму происходит в течение длительного маломощного импульса, следующего с некоторой временной задержкой после первого импульса или после пачки импульсов. Известно, что в неподвижном газе повторный электрический пробой газа облегчен по сравнению с первичным пробоем (см., например, [25, 26]). Это связано с тем фактом, что деионизация разрядного промежутка происходит в течение некоторого времени, т.е. к моменту подачи второго импульса в разрядном промежутке может еще находиться большое количество заряженных частиц. Наличие в газе долгоживущих возбужденных частиц также облегчает повторный пробой, так как ионизацию газа в этом случае могут производить электроны с малыми энергиями за счет ступенчатых процессов с участием метастабильных атомов и молекул. Нагрев газа в течение первого импульса при высоких давлениях также приводит к снижению повторного пробоя из-за снижения плотности газа в зоне существования первичного разряда.

По отношению к воспламенению неподвижной воздушно-углеводородной смеси уменьшение периода индукции в течение повторного разряда и увеличение полноты сгорания может происходить из-за реформирования углеводородного горючего (создание заряженных и возбужденных частиц, активных радикалов, а также нагрев горючего) в течение первого импульса. Что касается воспламенения высокоскоростных воздушно-углеводородных потоков, то режим программированного импульса может использоваться в такой комбинации, когда разряд в течение первого импульса создается перед входом в камеру сгорания, где происходит предварительная подготовка горючего, тогда как низкотемпературная плазма создается в течение повторного импульса в основной камере сгорания с временной задержкой, определяемой скоростью сноса реформированного горючего и расстоянием между областью предварительного возбуждения горючего и камерой сгорания.

В статье рассматривается влияние низкотемпературной плазмы комбинированного разряда, создаваемого в программированном режиме, на эффективность горения жидкого углеводородного топлива, инжектируемого

в капельной фазе в дозвуковой (число Маха потока $M < 1$) воздушный поток. Программированный разряд представляет собой комбинацию самостоятельного импульсно-периодического сверхвысокочастотного и несамостоятельного поперечного электродного разрядов, создаваемых на поверхности диэлектрической пластины. Поверхностный самостоятельный разряд служит для создания плазмы и инициации разряда постоянного тока, а также для генерации активных частиц и радикалов. Разряд постоянного тока служит для накачки энергии в плазму и стабилизации горения углеводородного топлива. Без использования СВЧ-разряда электродный разряд постоянного тока существовать в свободном воздушном потоке не может [27].

Для исследования возможности осуществления стабилизации с помощью комбинированного разряда горения жидкого спирта, инжектируемого в капельной фазе в высокоскоростную воздушную струю, истекающую в затопленное пространство, использовалась экспериментальная установка, включающая в себя вакуумную камеру, ресивер высокого давления воздуха, электромеханический клапан, систему для создания высокоскоростного потока с секундным массовым расходом воздуха $dm_1/dt = 10-100$ г/с, систему инжекции в высокоскоростной воздушный поток жидкого углеводородного топлива с секундным массовым расходом спирта $dm_2/dt = 0.5-3$ г/с, прямоугольный аэродинамический канал, магнетронный генератор, систему для ввода СВЧ-энергии в камеру, высоковольтный источник питания, систему синхронизации и диагностическую аппаратуру. Прямоугольный аэродинамический канал из-за технических особенностей установки располагался так, чтобы сверхзвуковой поток был направлен вдоль оси цилиндрической камеры под углом 15° к плоскости пластины, на которой создавался исследуемый разряд. В условиях экспериментов электромеханический клапан мог открываться на $\tau_1 = 0.3-3$ с. Система синхронизации позволяла вводить воздух и жидкие углеводороды в аэродинамический канал с фиксированными задержками по отношению друг к другу. В настоящей работе программированный разряд создавался в режиме, когда маломощный импульс включается в течение времени, равном длительности пачки коротких мощных импульсов. Число импульсов N в пачке можно было изменять от 1 до 100, частота повторения импульсов $f = 50$ Гц. В качестве маломощного импульса накачки использовался электродный разряд постоянного тока, который создавался с помощью источника постоянного тока с выходным напряжением 5 кВ. Разрядный ток мог изменяться от 1 до 20 А. Длительность τ программированного импульса изменялась от 0.8 до 1.2 с. На первом этапе в качестве жидкого углеводорода использовался технический спирт. Исследовалось горение бедных смесей, эквивалентное отношение по отношению к спирту $\Phi \sim 0.5-0.7$. Время задержки t_2 подачи жидкого спирта относительно переднего фронта программированного разряда изменялось от 0.2 до 0.3 с. В экспериментах использовался автоматизированный диагностический комплекс, состоящий из оптических рефракционных датчиков, фотоэлектронных умножителей, импульсной теневой установки, системы для измерения проводимости пламени, электрических зондов,



Рис. 1. Интегральная (без временного разрешения) фотография зоны горения спирта в дозвуковом потоке в условиях программированного импульса

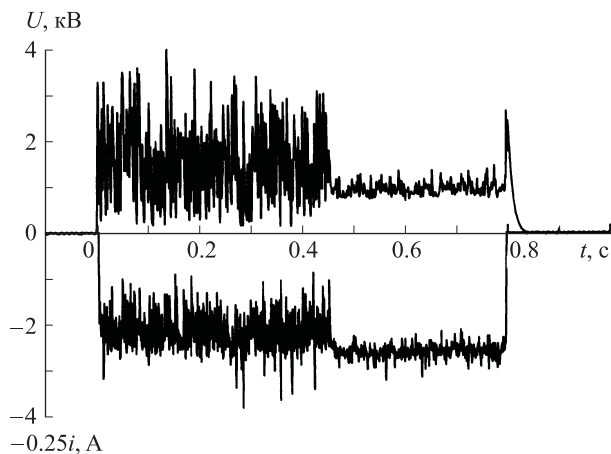


Рис. 2. Временной ход напряжения и тока в условиях программированного разряда в трансзвуковом воздушном потоке без инъекции спирта ($t = 0-0.3$ с) и при инъекции в поток жидкого спирта в процессе его воспламенения ($t = 0.3-0.45$ с) и стабилизации горения ($t = 0.45-0.8$ с). Давление воздуха в камере $p_0 = 1$ атм, секундный расход спирта $dm_2/dt = 0.5$ г/с, длительность программированного разряда $\tau = 0.8$ с, длительность инъекции спирта $\tau_2 = 0.5$ с, время задержки инъекции спирта $t_2 = 0.3$ с

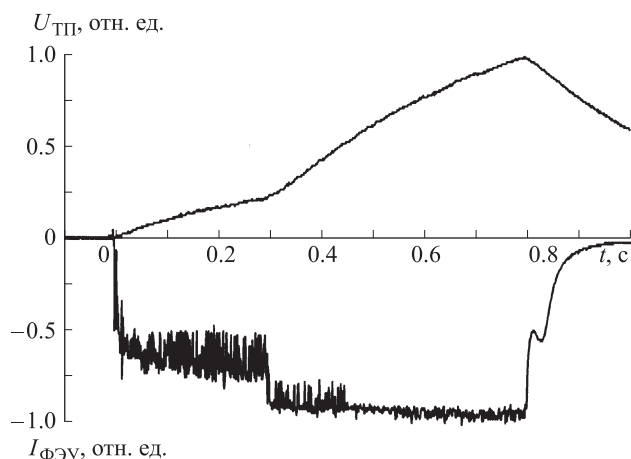


Рис. 3. Временной ход интегрального по спектру свечения и сигнала от термопары, установленной вниз по потоку на расстоянии 10 см от области горения. Условия те же, что на рис. 2

обтекаемой дозвуковой воздушной струей. На рис. 1 представлен общий вид процесса горения жидкого спирта, инжестируемого в воздушную струю, распространяющуюся слева направо. Скорость струи на выходе из канала равна 250 м/с. Рассеяние света от пламени на капельках спирта позволяет визуализировать поток горючего (на фотографии слева). Справа от зоны горения (область яркого белого свечения) вниз по потоку наблюдается зона слабого свечения. На рис. 2 представлена осциллограмма импульса напряжения на разрядном промежутке. Инжекция спирта в дозвуковой поток начинается спустя 0.3 с после включения разряда. До этого времени наблюдаются сильные осцилляции величины падения напряжения на разряде. После начала инъекции спирта в течение приблизительно 0.15 с сильные колебания напряжения сохраняются, а затем они резко уменьшаются и остаются на низком уровне вплоть до окончания импульса разрядного тока. Следует отметить, что, если инъекция спирта в поток прекращается до момента окончания импульса разрядного тока, то разряд переходит в пульсирующий режим, а колебания напряжения на разрядном промежутке снова резко возрастают. Что касается импульса разрядного тока (рис. 2), то после 0.45 с величина разрядного тока несколько возрастает, а его пульсации сглаживаются. После начала инъекции спирта испытывает резкий скачок интенсивность интегрального свечения, регистрируемая фотоэлектронным умножителем (рис. 3). Это связано с началом процесса воспламенения спирта. Однако, так же как и при разряде в воздухе, в этот период интенсивность свечения нестабильна. После того, как осцилляции напряжения на разрядном промежутке резко уменьшаются, сглаживается и сигнал с фотоэлектронного умножителя. Спустя время 0.3 с (рис. 3) происходит также резкий излом на сигнале, регистрируемом термопарой, расположенной на расстоянии $z = 10$ см от области горения, при этом скорость нарастания сигнала резко возрастает, что свидетельствует о том, что при горении происходит дополнительное выделение тепла в результате химических реакций. Зная мощность разряда и изменение сигнала от термопары в результате горения спирта, можно рассчитать, какая дополнительная энергия выделяется в условиях эксперимента. В различных реализациях при изменении внешних условий полнота сгорания спирта в условиях программированного разряда в дозвуковом воздушном потоке изменяется в пределах 60–80%.

На рис. 4 представлена динамика развития программированного разряда в дозвуковом воздушном потоке при атмосферном давлении воздуха в камере $p = 1$ атм. Длительность воздушного потока $\tau_1 = 1.5$ с, длительность импульса источника постоянного напряжения $\tau = 0.8$ с, длительность инъекции спирта $\tau_2 = 0.5$ с, время задержки начала впрыска спирта по отношению к моменту создания программированного разряда $t_2 = 0.3$ с. Средняя мощность разряда постоянного тока $W_2 \approx 11$ кВт, длительность СВЧ-импульсов $\tau = 20$ мкс, частота их следования $f = 50$ Гц, число импульсов в пачке $N = 40$, импульсная мощность $W_1 = 100$ кВт, средняя мощность $W = 100$ Вт. Режим работы высокоскоростной камеры: время экспозиции одного кадра — 4 мкс, временной интервал между кадрами — 200 мкс.

термопар, датчиков давления, двухпроводной линии, цифровых монохроматоров, спектрографов, осциллографов, фото- и видеокамер.

С помощью программированного импульса осуществлена стабилизация горения жидкого спирта на поверхности диэлектрической пластины длиной 10 см,

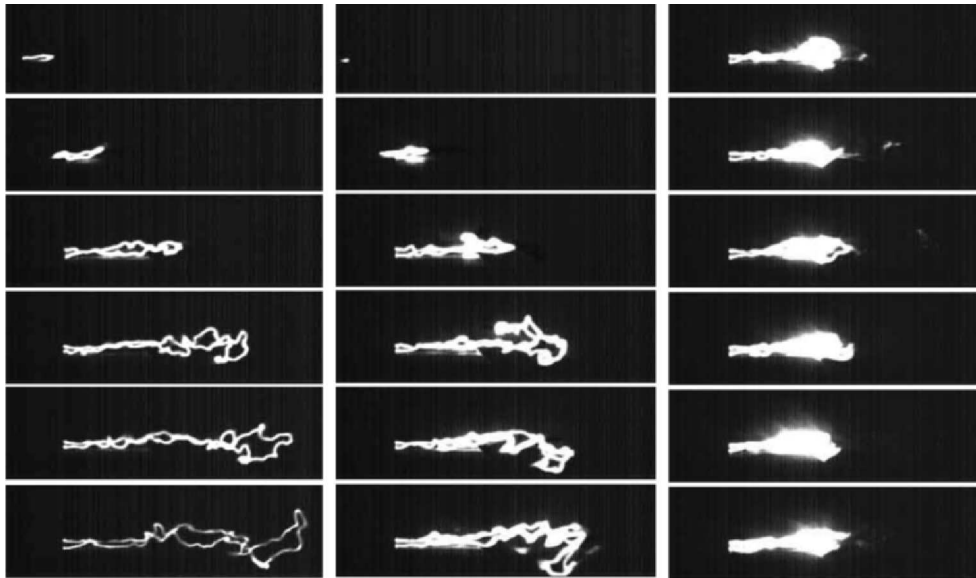


Рис. 4. Динамика развития процесса воспламенения и горения спирта в дозвуковом потоке воздуха в условиях программированного импульса

Слева — вид сбоку разряда в дозвуковом воздушном потоке (время регистрации — 56-я миллисекунда от начала разряда). Посередине — переходный процесс воспламенения воздушно-спиртового потока (320-я миллисекунда). Справа — стабилизация горения (760-я миллисекунда).

Температура газа в условиях программированного разряда без инжекции спирта — порядка 800 К, тогда как при воспламенении инжектируемого в поток спирта температура газа резко возрастает и достигает на расстоянии $z = 4$ см от кончиков электродов $T = 1800$ К. Следует отметить, что фиксируемая из области разряда без инжекции спирта интенсивность свечения полосы (0,0) молекулярного иона азота с длиной волны кванта $\lambda = 391.5$ нм соизмерима с интенсивностью свечения полосы (0,0) циана, тогда как при горении жидкого углеводорода интенсивность свечения полос циана на порядки величины превышает интенсивность свечения молекулярного иона азота. Концентрация заряженных частиц в пламени при горении жидких углеводородов в условиях программированного разряда измерялась с помощью двойного зонда, установленного вниз по потоку на расстоянии $z = 10$ см от электродов. В эксперименте использовались симметричные зонды с диаметром зондов 1 мм, длиной рабочей части 10 мм и расстоянием между центрами зондов 5 мм. Концентрация электронов на таком расстоянии от области горения порядка $n_e \sim 10^9$ см⁻³. Интегральная интенсивность свечения при воспламенении увеличивается всего на 25–30%, тогда как интенсивность свечения гидроксила ОН, который является активным веществом, способствующим развитию цепного механизма горения углеводородов, и эффективно нарабатывается в процессе горения углеводородного топлива, резко (приблизительно в 30 раз) возрастает. Этот факт также подтверждает, что в условиях программированного разряда происходит воспламенение и стабилизация горения жидкого спирта, инжектируемого в капельной фазе в дозвуковой воздушный поток.

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

Список литературы

1. Starikovskaya S.M. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2006. **39**. P. R265.
2. Adamovich I.V., Lempert W.R., Nishihara M. et al. // J. Propulsion and Power. 2008. **24**, N 6. P. 1198.
3. Starikovskii A.Y., Anikin N.B., Kosarev I.N. et al. // J. Propulsion and Power. 2008. **24**, N 6, P. 1182.
4. Shibkov V.M., Aleksandrov A.F., Chernikov V.A. et al. // J. Propulsion and Power. 2009. **25**, N 1. P. 123.
5. Dutta A., Choi I., Uddi M. et al. // Proc. 47th Aerospace Sci. Meeting and Exhibit. 5–8 January 2009, Orlando (FL), USA. AIAA-2009-0821.
6. Bityurin V.A. // Proc. 39th Aerospace Sci. Meeting and Exhibit. 2001, Reno (NV), USA. AIAA-2001-2874.
7. Кочетов И.В., Напартович А.П., Леонов С.Б. // Химия высоких энергий. 2006. **40**, № 2. С. 1.
8. Шибкова Л.В. Физические процессы в движущейся плазме многокомпонентных инертных и химически активных смесей: Дисс. ... докт. физ.-мат. наук. М., 2007.
9. Vinogradov V.A., Shikhman Y.M., Kossiy I.A. et al. // Proc. 47th AIAA Aerospace Sci. Meeting and Aerospace Exhibit. 5–8 January 2009, Orlando (Florida), USA. AIAA-2009-494.
10. Esakov I., Grachev L., Khodataev K., Wie D. van // Proc. 42nd Aerospace Sci. Meeting and Exhibit. 2004, Reno, USA. AIAA-2004-0840.
11. Константиновский Р.С., Шибков В.М., Шибкова Л.В. // Кинетика и катализ. 2005. № 6. С. 821.
12. Шибков В.М., Виноградов Д.А., Восканян А.В. и др. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 2000. № 6. С. 64.
13. Шибков В.М., Ершов А.П., Черников В.А., Шибкова Л.В. // ЖТФ. 2005. **75**, № 4. С. 67.
14. Шибков В.М., Двинин С.А., Ершов А.П., Шибкова Л.В. // ЖТФ. 2005. **75**, № 4. С. 74.
15. Шибков В.М., Двинин С.А., Ершов А.П. и др. // Физика плазмы. 2007. **33**, № 1. С. 77.
16. Шибкова Л.В. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 2007. № 5. С. 62.

17. Шибков В.М., Шибкова Л.В., Карачев А.А. // ТВТ. 2009. **47**, № 5. С. 650.
18. Александров А.Ф., Шибков В.М., Шибкова Л.В. // ТВТ. 2010. **80**, № 5. С. 643.
19. Александров А.Ф., Шибков В.М., Шибкова Л.В. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 2008. № 5. С. 68.
20. Шибков В.М., Шибкова Л.В., Громов В.Г. и др. // ТВТ. 2011. **49**, № 2. С. 163.
21. Александров А.Ф., Шибков В.М., Шибкова Л.В. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 2008. № 6. С. 65.
22. Шибков В.М., Шибкова Л.В. // ЖТФ. 2009. **79**, № 10. С. 65.
23. Шибков В.М., Шибкова Л.В. // ЖТФ. 2010. **80**, № 1. С. 59.
24. Шибков В.М., Шибкова Л.В., Карачев А.А., Константиновский Р.С. // ТВТ. 2010. **48**, № 1 (доп.). С. 23.
25. Зарин А.С., Кузовников А.А., Шибков В.М. Свободно локализованный СВЧ-разряд в воздухе. М., 1996.
26. Шибкова Л.В., Шибков В.М. Разряд в смесях инертных газов. М., 2005.
27. Gusev I.N., Karachev A.A., Kopyl P.V. et al. // The 10th Intern. Workshop on Magneto-Plasma Aerodynamics: Abstracts. Institute of High Temperature of RAS, Moscow, 21–24 March 2011. P. 53.

Spatially-temporary evolution of combustion under conditions of low temperature discharge plasma of liquid alcohol, injected into an air stream

V. M. Shibkov, L. V. Shibkova, A. A. Karachev, P. V. Kopyl, O. A. Surkont

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

E-mail: shibkov@phys.msu.ru.

Stabilization of combustion of liquid alcohol, injected in a drop phase with the second mass consumption $dm_2/dt = 0.5-3$ g/s into a subsonic air jet with the second mass consumption $dm_1/dt = 10-100$ g/s, flowing in the flooded space (air of atmospheric pressure) is realized under conditions of the combined discharge created in a programmable pulse mode.

Keywords: low temperature plasma, high speed air flow, supersonic plasma aerodynamic, combustion.

PACS: 52.80.-s, 52.40.Fd, 52.70.-m, 52.50.Dg, 82.33.Xj, 82.33.Vx.

Received 07 July 2011.

English version: *Moscow University Physics Bulletin* 1(2012).

Сведения об авторах

1. Шибков Валерий Михайлович — докт. физ.-мат. наук, профессор, 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; (495) 939-13-37, e-mail: shibkov@ph-elec.phys.msu.ru.
3. Карачев Андрей Александрович — аспирант; тел.: (495) 939-13-37, e-mail: shibkov@phys.msu.ru.
4. Копыл Павел Владимирович — аспирант; тел.: (495) 939-13-37, e-mail: shibkov@phys.msu.ru.
5. Сурконт Олег Александрович — мл. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-13-37, e-mail: shibkov@phys.msu.ru.