

ХИМИЧЕСКАЯ ФИЗИКА, ФИЗИЧЕСКАЯ КИНЕТИКА И ФИЗИКА ПЛАЗМЫ

Внешнее горение высокоскоростных многокомпонентных воздушно-углеводородных потоков в условиях низкотемпературной плазмыА. Ю. Бауров, Л. В. Шибкова, В. М. Шибков^а, 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: ^аshibkov@phys.msu.ru*

Статья поступила 04.02.2013, подписана в печать 12.04.2013.

Экспериментально реализована стабилизация внешнего (на поверхности пластины) горения высокоскоростных многокомпонентных (воздух, спирт, пропан) потоков. Показано, что при сгорании спирта тепловые потоки возрастают приблизительно в 7 раз, а при горении пропана — в 15 раз по сравнению с тепловыми потоками от разряда, создаваемого в высокоскоростном воздушном потоке. Концентрация электронов, измеренная на расстоянии 10 см вниз по потоку от кончиков электродов, равна приблизительно 10^9 см^{-3} при создании разряда в потоке воздуха, тогда как при горении спирта достигает $2 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$, а при горении пропана равна $3 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$. Температура пламени в области существования разряда изменяется от 2000 до 2500 К, а вне разряда на расстоянии $z = 20$ см от электродов равна 1800 К, постепенно уменьшаясь вниз по потоку. Показано, что в условиях комбинированного разряда в дозвуковом потоке реализуется полное сгорание жидких и газообразных углеводородов. В условиях сверхзвуковых потоков полнота сгорания в зависимости от скорости потока достигает 95%.

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

УДК: 533.9. PACS: 52.80.-s, 82.33.Vx, 52.70.-m, 82.33.Xj.

Для развития современной авиации и космических технологий, предназначенных для высоких скоростей полета, требуется поиск и разработка новых фундаментальных методов, позволяющих обеспечивать быстрое объемное воспламенение и управление процессом горения углеводородного топлива в условиях высокоскоростного потока. Одним из новых решений проблемы уменьшения времени воспламенения горючего и увеличения эффективности горения и полноты сгорания топлива является использование газового разряда. В условиях неравновесной низкотемпературной плазмы возможен режим горения, когда наработка активных частиц практически на всем протяжении реакции осуществляется электронным ударом [1]. Методы управления горением воздушно-углеводородных потоков, основанные на генерации электрических разрядов, представляются в настоящее время наиболее перспективными [1–20]. Разнообразие типов электрических разрядов позволяет в широких пределах менять соотношение между вкладами различных механизмов. Применение комбинированных разрядов различного типа может обеспечить необходимую скорость и интенсивность горения.

Во всех типах реактивных двигателей стабильное горение поддерживается с помощью специальных устройств (застойных зон, каверн и т. п.), служащих для предотвращения срыва пламени высокоскоростным потоком. Конструкция этих устройств должна учитывать баланс между вносимым ими дополнительным сопротивлением потоку и стабилизацией пламени. В свободном сверхзвуковом потоке в принципе невозможно удержать пламя без специальных мер. Одним из таких способов является использование газоразрядной плаз-

мы. В условиях импульсного самостоятельного разряда сверхзвуковое горение свободных воздушно-углеводородных потоков происходит только в течение длительности импульса, и пламя срывается, как только подвод энергии прекращается.

Для стационарного горения при использовании нестационарной низкотемпературной плазмы необходимо оптимизировать режим инициации импульсного разряда, т. е. величину вкладываемой в плазму энергии, длительность и частоту следования импульсов. Это может быть осуществлено с помощью комбинированного разряда, создаваемого в режиме программированного импульса [21], когда повторный электрический пробой газа облегчен по сравнению с первичным (смотри, например, [21, 22]). В программированном режиме пробой газа, поддержание плазмы и вклад энергии в заданную область пространства осуществляются с помощью разряда, мощность которого изменяется по наперед заданной программе.

В настоящей работе исследовано влияние низкотемпературной плазмы комбинированного разряда, создаваемого в программированном режиме, на эффективность горения жидкого и газообразного углеводородного топлива, инжектируемого в дозвуковой (число Маха потока $M < 1$) и сверхзвуковой ($M > 1$) воздушные потоки. Такой 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.

Для исследования возможности осуществления с помощью комбинированного разряда стабилизации горения многокомпонентных углеводородных смесей, инжектируемых в высокоскоростную воздушную струю, истекающую в затопленное пространство, использовалась экспериментальная установка, подробно описанная в [18] и включающая в себя вакуумную камеру, ресивер высокого давления воздуха, электромеханический клапан, систему для создания высокоскоростного потока с секундным массовым расходом воздуха $dm_1/dt = 10\text{--}100$ г/с, систему для инъекции пропана $dm_2/dt = 2\text{--}10$ г/с, систему инъекции в высокоскоростной воздушный поток жидкого углеводородного топлива с секундным массовым расходом $dm_3/dt = 0.5\text{--}3$ 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 $\tau_1 = 0.2\text{--}3$ с. Система синхронизации позволяет вводить воздух, пропан и жидкие углеводороды в аэродинамический канал с фиксированными задержками по отношению друг к другу. В данной работе комбинированный разряд создавался в режиме, когда маломощный импульс включается в течение времени, равного 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 1.5 с.

В экспериментах использовался автоматизированный диагностический комплекс, состоящий из оптических рефракционных датчиков, фотоэлектронных умножителей, импульсной теневой установки, системы для измерения проводимости пламени, электрических зондов, термодатчиков, датчиков давления, датчиков измерения абсолютной и относительной влажности, датчиков измерения концентрации пропана, датчиков измерения концентрации углекислого газа, двухпроводной линии, цифровых монохроматоров, спектрографов, осциллографов, фото и видеокамер.

В работе с помощью комбинированного разряда осуществлена стабилизация внешнего горения жидкого спирта, газообразного пропана, а также их смесей на поверхности диэлектрической пластины длиной 10 см, обтекаемой высокоскоростной воздушной струей.

Для примера на рис. 1 представлен общий вид без временного разрешения внешнего горения пропан-воз-



Рис. 1. Стабилизация внешнего горения дозвукового пропан-воздушного потока в условиях комбинированного разряда

душного потока. При фотографировании специально была закрыта экраном ярко светящаяся зона горения высокоскоростного пропан-воздушного потока в области существования комбинированного разряда. Поэтому на фотографии виден только самый край этой ярко светящейся области и голубое свечение пламени вниз по потоку. Без инъекции пропана в высокоскоростную струю, или при вкладываемой в разряд электрической мощности меньше 4 кВт, а также в случае бедных (эквивалентное отношение пропана $\alpha < 0.3$) или богатых ($\alpha > 2$) топливных смесей плазменно-стимулированное горение высокоскоростных воздушно-углеводородных потоков в условиях нашего эксперимента не реализуется.

Для измерения продольного (вдоль потока) распределения температуры газа регистрировался спектр излучения пламени на различных расстояниях от кончиков электродов. Спектр 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 $\lambda = 388.3$ нм и $\lambda = 387.1$ нм. При моделировании спектра распределение по вращательным и колебательным уровням предполагалось больцмановским. Использовались разработанные нами 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 полученного при расчете молекулярного спектра. На рис. 2 представлены экспериментально полученные спектры излучения пламени при горении пропан-воздушного потока. Видно, что в области разряда вблизи электродов спектр состоит только из полос CN, тогда как на больших расстояниях ($z = 15\text{--}25$ см) от разрядной области спектр излучения пламени содержит в основном полосы радикала СН. Получено, что в области существования разряда $z = 0\text{--}10$ см от кончиков электродов температура газа изменяется от 2500 до 2000 К, тогда как вне разряда на расстоянии $z = 15$ см температура пламени равна приблизительно 1800 К, постепенно уменьшаясь вниз по потоку.

В эксперименте инъекция пропана производилась в течение 1 с в высокоскоростной поток воздуха (длительность потока 2 с) с временной задержкой 0.5 с относительно старта воздушного потока. В течение времени инъекции пропана на внешней поверхности пластины создавался разряд. Система спектральных измерений позволяла регистрировать с экспозицией 20 мс сорок спектров за одну секунду. На рис. 3 представлен временной ход температуры пламени, измеренный

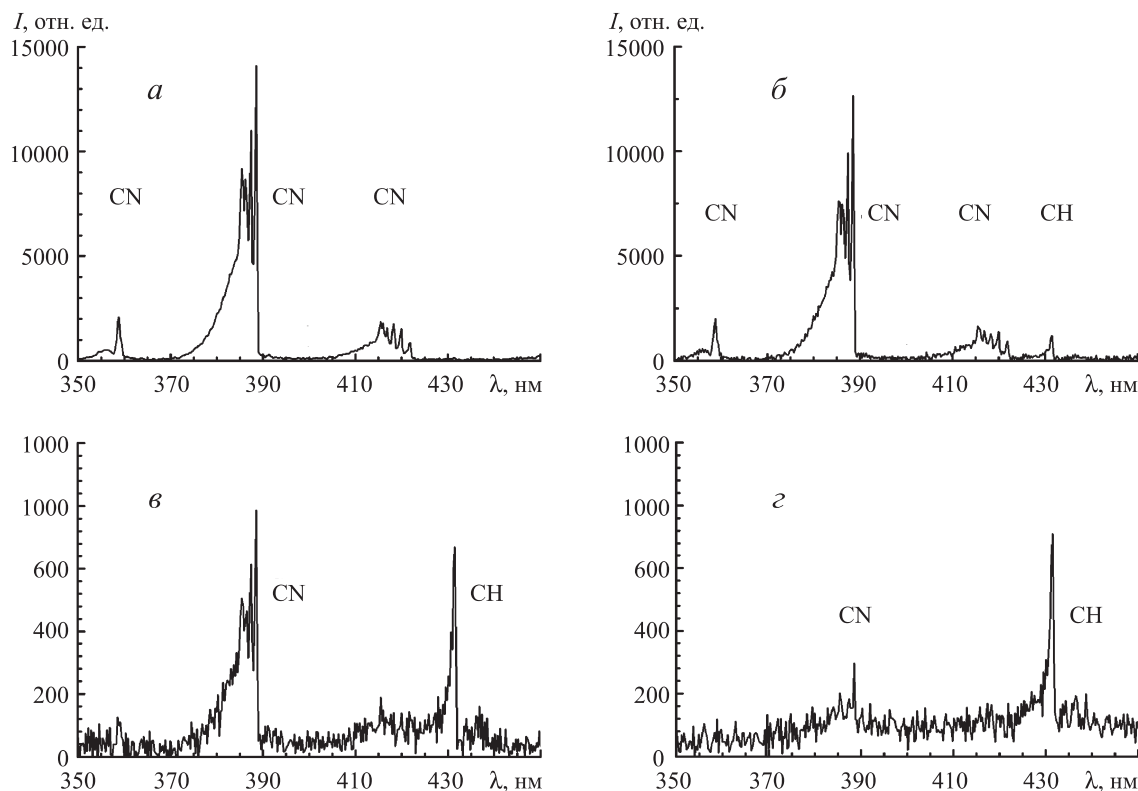


Рис. 2. Спектр пламени при горении пропан-воздушного потока на различных расстояниях от концов электродов z , см: 6 (1); 8 (2); 15 (3); 25 (4)

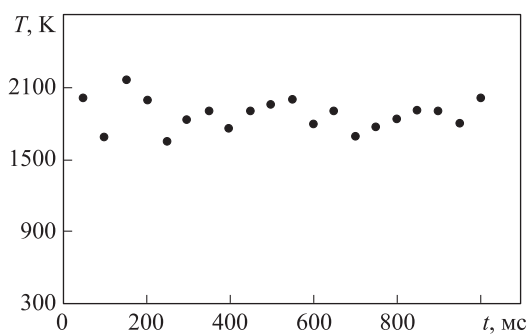


Рис. 3. Температура пламени при горении высокоскоростного пропан-воздушного потока на расстоянии $z = 12$ см от концов электродов

на расстоянии $z = 12$ см. Видно, что средняя за время горения пропана температура пламени порядка 1850 К, причем спустя 200 мс после воспламенения осуществляется стабилизация плазменно-стимулированного горения.

Экспериментально реализована стабилизация внешнего (на поверхности пластины) горения дозвукового спирт-пропан-воздушного потока. Показано, что в дозвуковом потоке при горении спирта в условиях комбинированного разряда тепловой поток возрастает приблизительно в 7 раз, а при горении пропана в 15 раз по сравнению с потоком тепла от разряда в воздушном потоке без инъекции топлива (рис. 4).

Определение степени ионизации газа при горении спирт-пропан-воздушного потока проводилось методом измерения поглощения зондирующего маломощного (100 мВт) микроволнового излучения. Для этого применялась двухпроводная линия. В качестве источника

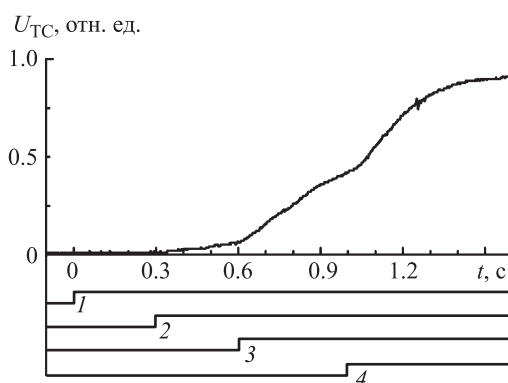


Рис. 4. Временная зависимость сигнала, регистрируемого термпарой, расположенной вниз по потоку на расстоянии $z = 15$ см от электродов: 1 — старт высокоскоростного воздушного потока; 2 — момент включения разряда постоянного тока; 3 — начало инъекции спирта; 4 — инъекция пропана

микроволнового излучения был выбран СВЧ-генератор, работающий на длине волны 8 мм. Вначале использовалась двухпроводная линия, изготовленная из молибденовых проволочек толщиной 0.3 мм, расстояние между которыми было 4 мм. Такая конструкция позволяет локализовать в малой области зондирующее излучение и избежать рефракции на высокоскоростном потоке пламени, что невозможно предотвратить в стандартных методах подвода диагностического микроволнового излучения. Двухпроводная линия располагалась перпендикулярно потоку на расстоянии 15 см от кончиков электродов. Это предотвращало замыкание разряда на двухпроводную линию. Было получено, что concentra-

ция электронов при создании разряда в воздушном потоке без инъекции пропана и спирта не превышала 10^9 см^{-3} . Первые же пуски с инъекцией газообразного или жидкого углеводорода привели к тому, что проволоочки, находящиеся в зоне пламени, расплавились в течение 200–300 мс после начала горения. Этот факт был зафиксирован с помощью высокоскоростной видеокамеры. После этого была проведена модификация двухпроводной линии. Проволочки были заменены на пластины толщиной 1 мм и шириной 3 мм. Такая конструкция выдерживала тепловые нагрузки без расплавления в течение двух секунд.

Концентрация электронов, измеренная на расстоянии 15 см от электродов вниз по потоку с помощью модифицированной двухпроводной линии по поглощению зондирующего маломощного микроволнового излучения, представлена рис. 5. Видно, что концентрация электронов при создании разряда в воздушном потоке без инъекции углеводородов не превышает величины 10^9 см^{-3} . При горении спирта концентрация электронов в области пламени достигает величины $2 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$, а при горении пропана равна $3 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$.

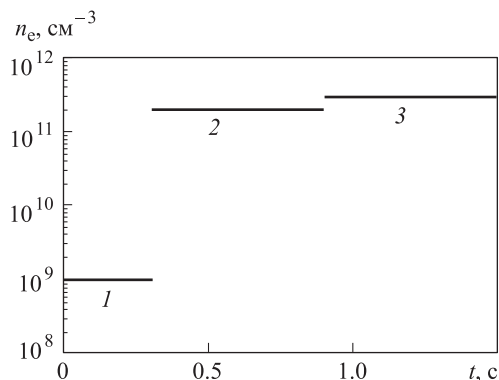


Рис. 5. Временной ход концентрации электронов, измеренный с помощью двухпроводной линии, помещенной на расстоянии $z = 15$ см от электродов: 1 — разряд постоянного тока в потоке воздуха; 2 — горение спирта; 3 — горение пропана

Температура пламени при горении углеводородного топлива измерялась также с помощью накаливаемого зонда. Расчет для плотности тока насыщения на двойной накаливаемый зонд проводился по формуле

$$j_0 = AT^2 \exp\left(-\frac{F}{kT}\right),$$

где $A = A_0(1 - \bar{r})$, $A_0 = 4\pi e k^2 m_e / h = 120.4 \text{ A}/(\text{см}^2 \cdot \text{K}^2)$, F — работа выхода электрона, в расчете принималось, что усредненный по энергиям коэффициент отражения электронов от поверхности эмиттера $\bar{r} = 0.3\text{--}0.7$.

На рис. 6 представлена рассчитанная калибровочная зависимость тока насыщения на двойной вольфрамовый накаливаемый зонд от температуры. В эксперименте двойной зонд помещался на выходе из канала, в котором осуществлялось воспламенение и стабилизация горения высокоскоростного пропан-воздушного потока. Параметры двойного зонда: материал — вольфрамовая

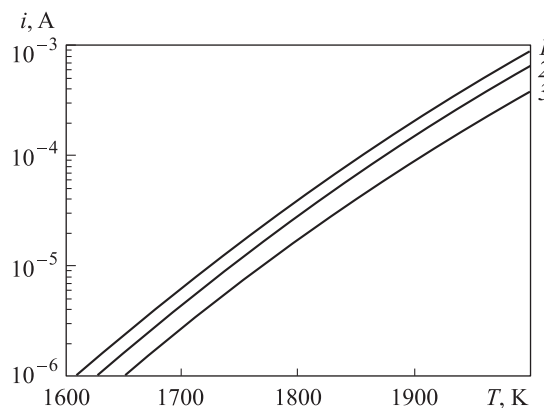


Рис. 6. Зависимость тока насыщения на двойной вольфрамовый накаливаемый зонд от температуры при $\bar{r} = 0.3$ (1); 0.5 (2); 0.7 (3)

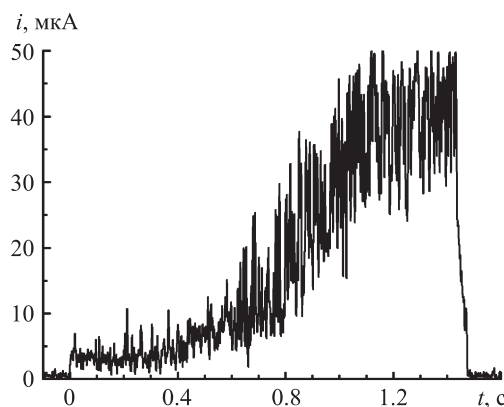


Рис. 7. Временной ход тока насыщения на двойной зонд, помещенный в область горения высокоскоростного пропан-воздушного потока

проволока диаметром 1 мм и длиной 2 см; расстояние между зондами 2 мм; напряжение между зондами 15 В. После воспламенения пропан-воздушного потока двойной зонд начинает нагреваться, что хорошо видно на рис. 7, где представлен временной ход тока насыщения на двойной зонд, помещенный в область горения высокоскоростного пропан-воздушного потока. Вначале, пока зонд не нагрет и термоэмиссионный ток с его поверхности равен нулю, регистрируемый ток определяется концентрацией заряженных частиц в потоке пламени. По мере нагревания зонда горячим потоком ток термоэлектронной эмиссии растет и спустя время приблизительно 1 с после начала горения он выходит на установившееся значение, т. е. температура зонда к этому времени принимает стационарное значение. Температура пламени на выходе из канала была определена по графику зависимости тока насыщения на двойной зонд от температуры (см. рис. 6) в предположении, что в установившемся режиме температура зонда равна температуре потока. В эксперименте ток термоэлектронной эмиссии за вычетом тока проводимости ионизованного газа (пламени) достигает 40 мкА. Этому соответствует температура пламени на выходе из канала $T = 1800\text{--}1850 \text{ K}$. Полученная с помощью накаливаемого зонда температура пламени с хорошей точностью совпадает с температурой, измеренной спектральным методом (см. рис. 3).

Для измерения полноты сгорания углеводородного топлива использовались несколько методик. Во-первых, в эксперименте измерялась температура пламени в условиях высокоскоростного горения. Зная секундный массовый расход воздуха и пропана, можно определить, сколько углеводородного топлива должно сгореть, чтобы нагреть струю пламени до измеренной температуры. Во-вторых, измерялась температура газа в закрытой камере сразу же после пуска. Зная массу воздуха в камере, можно определить, какое количество теплоты должно выделиться, чтобы нагреть всю газообразную среду до измеренной температуры, и соответственно сколько топлива должно при этом сгореть. В-третьих, проводилось измерение давления в закрытой камере в процессе пуска воздуха без разряда, с разрядом без горения и в результате горения углеводородного топлива. Отсюда также можно определить долю сгоревшего пропана. В-четвертых, проводилась регистрация концентрации паров воды в камере после сгорания пропана. Зная количество пропана, вводимого в поток, можно рассчитать концентрацию паров воды, которая должна образоваться при полном сгорании пропана. Сравнивая эту величину с измеренной концентрацией паров воды, образовавшейся в эксперименте, можно рассчитать полноту сгорания пропана. Так, например, при скорости потока 450 м/с при полном сгорании пропана должно было образоваться 14.2 г воды, а экспериментально измеренное по изменению абсолютной влажности в камере количество образовавшейся воды получилось 13.8 г. Этому соответствует полнота сгорания 97 %. Полнота сгорания определялась также с помощью датчика пропана, расположенного внутри закрытой камеры. Полученные таким образом результаты представлены на рис. 8. Видно, что в условиях комбинированного разряда в дозвуковом потоке происходит полное сгорание углеводородного топлива, а в сверхзвуковых потоках полнота сгорания достигает 95 %.

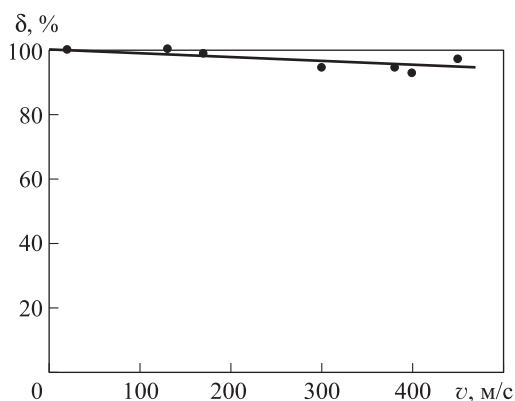


Рис. 8. Зависимость доли сгоревшего пропана от скорости пропан-воздушного потока

Полученные результаты подтверждают эффективность использования комбинированного разряда в плазменной аэродинамике.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 11-02-01091-а).

Список литературы

1. Константиновский Р.С., Шибков В.М., Шибкова Л.В. // Кинетика и катализ, 2005. **46**, № 6. С. 821
2. Adamovich I.V., Lempert W.R., Nishihara M. et al. // J. Propulsion and Power. 2008. **24**, N 6. P. 1198.
3. Starikovskaya S.M. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2006. **39**. P. R265.
4. Shibkov V.M., Aleksandrov A.F., Chernikov V.A. et al. // Journal of 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, USA. AIAA-2009-0821.
6. Starikovskii A.Y., Anikin N.B., Kosarev I.N. et al. // J. Propulsion and Power. 2008. **24**, N 6. P. 1182.
7. Bityurin V.A. // Proc. 39th Aerospace Sci. Meeting and Exhibit. 2001. Reno, NV, USA, AIAA-2001-2874.
8. Шибкова Л.В. Физические процессы в движущейся плазме многокомпонентных инертных и химически активных смесей: Дисс. ... доктора физ.-мат. наук. М., 2007.
9. Vinogradov V.A., Shikhman Y.M., Kossiy I.A. et al. // Proc. 47th Aerospace Sci. Meeting and Exhibit. 5–8 January 2009. Orlando, USA. AIAA-2009-494.
10. Esakov I., Grachev L., Khodataev K., Van. Wie D. // Proc. 42nd Aerospace Sci. Meeting and Exhibit. 2004. Reno, USA. AIAA-2004-0840.
11. Шибкова Л.В. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 2007. № 5. С. 62.
12. Александров А.Ф., Шибков В.М., Шибкова Л.В. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 2008. № 5. С. 68.
13. Шибков В.М., Шибкова Л.В., Громов В.Г. и др. // ТВТ. 2011. **49**. № 2. С. 163.
14. Александров А.Ф., Шибков В.М., Шибкова Л.В. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 2008. № 6. С. 65.
15. Шибков В.М., Шибкова Л.В. // ЖТФ. 2009. **79**, № 10. С. 65.
16. Шибков В.М., Шибкова Л.В. // ЖТФ. 2010. **80**, № 1. С. 59.
17. Шибков В.М., Шибкова Л.В., Карачев А.А., Константиновский Р.С. // ТВТ. 2010. **48**, № 1 (доп.). С. 23.
18. Копыл П.В., Сурконт О.С., Шибков В.М., Шибкова Л.В. // Физика плазмы. 2012. **38**, № 6. С. 551.
19. Шибков В.М., Шибкова Л.В., Карачев А.А. и др. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 2012. № 1. С. 141.
20. Шибков В.М., Шибкова Л.В., Копыл П.В., Сурконт О.С. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 2012. № 3. С. 68.
21. Зарин А.С., Кузовников А.А., Шибков В.М. Свободно локализованный СВЧ-разряд в воздухе. М., 1996.
22. Шибкова Л.В., Шибков В.М. Разряд в смесях инертных газов. М., 2005.

External combustion of high-speed multicomponent air-hydrocarbon streams under conditions of low-temperature plasma**A. Yu. Baurov, L. V. Shibkova, V. M. Shibkov^a, 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.*

Experimentally implemented an external (to the plate surface) combustion of high-speed multicomponent streams. It is shown that the heat flux from the combustion of alcohol increases about 7 times, and the combustion of propane gas 15 times compared to the heat flow from the discharge generated in a high speed air stream. The electron density, measured at 10 cm downstream from the tips of the electrodes, is about 10^9 cm^{-3} to create a discharge in a stream of air, while the combustion of alcohol is $2 \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-3}$, and the combustion of propane is $3 \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-3}$. Flame temperature varies from 2000 to 2500 K in the existence of the discharge area, and at a distance $z = 20 \text{ cm}$ from the electrodes is equal to 1800 K, gradually decreasing downstream. It is shown that complete combustion of liquid and gaseous hydrocarbons is realized under condition of a combined discharge in subsonic flow. In the supersonic flow combustion efficiency varies from 90 to 100% depending on the flow rate.

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

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

Received 4 February 2013.

English version: *Moscow University Physics Bulletin* 4(2013).

Сведения об авторах

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