

УДК 629.7

## О ВОЗМОЖНОСТИ УСКОРЕНИЯ ГОРЕНИЯ В КАМЕРАХ СГОРАНИЯ ПЕРСПЕКТИВНЫХ РЕАКТИВНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ПРИ ПОМОЩИ ГЛУБОКО ПОДКРИТИЧЕСКОГО СВЧ-РАЗРЯДА

П.В. Булат<sup>a</sup>, И.И. Есаков<sup>b</sup>, И.А. Волобуев<sup>a,c</sup>, Л.П. Грачев<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

<sup>b</sup> Московский радиотехнический институт РАН, Москва, 117519, Российская Федерация

<sup>c</sup> ООО «ВНХ-Энерго», Санкт-Петербург, 198035, Российская Федерация

Адрес для переписки: [pavelbulat@mail.ru](mailto:pavelbulat@mail.ru)

### Информация о статье

Поступила в редакцию 05.02.16, принята к печати 01.03.16

doi:10.17586/2226-1494-2016-16-2-382-385

Язык статьи – русский

**Ссылка для цитирования:** Булат П.В., Есаков И.И., Волобуев И.А., Грачев Л.П. О возможности ускорения горения в камерах сгорания перспективных реактивных двигателей при помощи глубоко подкритического СВЧ-разряда // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2016. Т. 16. № 2. С. 382–385. doi:10.17586/2226-1494-2016-16-2-382-385

### Аннотация

Рассматривается проблема увеличения скорости распространения фронта горения в приложении к задачам снижения вредных выбросов оксидов азота, образующихся при работе реактивных двигателей и промышленных турбин, а также стабилизации сверхзвукового горения. Исследуется возможность уменьшения времени индукции при помощи холодной неравновесной плазмы, создаваемой электромагнитным вибратором в луче квазиоптического СВЧ-излучения. Положительное влияние холодной неравновесной плазмы на увеличение скорости протекания окислительных реакций в воздухе хорошо известно и никем не оспаривается. Представленные результаты проведенных экспериментов демонстрируют преимущество разрабатываемого метода с точки зрения коэффициента полезного действия и подавления выделения оксидов азота. Также продемонстрировано, что аналогичным образом достигается стабилизация горения в сверхзвуковом потоке.

### Ключевые слова

газовая динамика, квазиоптическое СВЧ-излучение, холодная неравновесная плазма, сверхзвуковое горение, эмиссия оксидов азота.

## ON THE POSSIBILITY OF BURNING ACCELERATION IN THE COMBUSTION CHAMBERS OF ADVANCED JET ENGINES BY DEEPLY SUBCRITICAL MICROWAVE DISCHARGE

P.V. Bulat<sup>a</sup>, I.I. Esakov<sup>b</sup>, I.A. Volobuev<sup>a,c</sup>, L.P. Grachev<sup>b</sup>

<sup>a</sup> ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

<sup>b</sup> Moscow Radiotechnical Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 117519, Russian Federation

<sup>c</sup> VNH-Energo, Saint Petersburg, 198035, Russian Federation

Corresponding author: [pavelbulat@mail.ru](mailto:pavelbulat@mail.ru)

### Article info

Received 05.02.16, accepted 01.03.16

doi:10.17586/2226-1494-2016-16-2-382-385

Article in Russian

**For citation:** Bulat P.V., Esakov I.I., Volobuev I.A., Grachev L.P. On the possibility of burning acceleration in the combustion chambers of advanced jet engines by deeply subcritical microwave discharge. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2016, vol. 16, no. 2, pp. 382–385. doi:10.17586/2226-1494-2016-16-2-382-385

### Abstract

The paper deals with the problem of increasing the speed of propagation of the flame front as applied to the problems of reducing noxious emissions of nitrogen oxides formed during operation of jet engines and industrial turbines, as well as the stabilization of a supersonic combustion. We investigate the possibility of reducing the induction time using non-equilibrium cold plasma produced by an electromagnetic vibrator in beam quasi-optical MW radiation. The positive effect of cold non-equilibrium plasma on increasing the rate of occurrence of oxidation reactions in the air is well known and undisputed. The presented results of the experiments demonstrate the advantage of the method developed in terms of efficiency and suppression of nitrogen oxide emissions. Also they show that combustion stabilization is achieved similarly in a supersonic flow.

### Keywords

gas dynamics, quasi-optical microwave radiation, cold non-equilibrium plasma, supersonic combustion, emission of nitrogen oxides

В работе представлены результаты некоторых экспериментов, полученных при обработке метода увеличения скорости горения путем введения в зону горения холодной неравновесной плазмы. Плазма создается глубоко подкритическим разрядом, возбуждаемым электромагнитным вибратором в квазиоптическом СВЧ-пучке [1]. Глубоко подкритическим называется разряд, созданный электромагнитным полем, напряженность которого  $E_k$  намного меньше напряженности пробоя воздуха. Разновидности СВЧ-разрядов в газовой среде, методы их создания подробно рассмотрены в работах [2, 3]. Проведенные авторами эксперименты убедительно доказывают существенное, до десятков и сотен метров в секунду, увеличение скорости горения при помощи разряда, рассматриваемого в настоящей работе типа.

Обычно плазму применяют в системах зажигания реактивных двигателей [4], что объясняется уверенным розжигом камеры сгорания на любой высоте полета и в самых трудных условиях, в том числе изучается и возможность поджигания топливной смеси в сверхзвуковом потоке [5]. С другой стороны, существующие в настоящее время плазменные системы используют виды разрядов (например, коронный), которые характеризуются чрезвычайно низким КПД. Кроме того, применяемая обычно равновесная плазма и надкритические разряды приводят к резкому увеличению эмиссии  $\text{NO}_x$ . В связи с этим в случаях, когда требуется длительная работа плазменной системы, например, для управления эмиссией вредных выбросов [6] или стабилизации горения в сверхзвуковом потоке, необходимо применять более экономичные способы создания СВЧ-разрядов. Именно такой способ и рассматривается в настоящей работе.

В настоящее время перед проектировщиками газотурбинных двигателей поставлены амбициозные задачи: увеличение термодинамического КПД на 15–25%, удельной мощности на 50–70%, кратное снижение эмиссии  $\text{NO}_x$ . Панацеей при решении всех этих задач может служить применение камер сгорания с детонационным горением, исследования которых ведутся во всем мире [7]. Активно изучаются различные способы интенсификации горения, в том числе и перехода медленного горения в детонацию [8], а также инициирования детонации при помощи СВЧ-разряда [9]. Пока детонационные технологии не созданы, актуальна разработка экономичных методов интенсификации обычного медленного горения.

Увеличение скорости горения положительно сказывается на уменьшении эмиссии  $\text{NO}_x$  при сохранении эмиссии окиси углерода (СО) на том же уровне за счет уменьшения времени пребывания продуктов горения в области высоких температур. Глубоко подкритический разряд и холодная неравновесная плазма самостоятельно не могут являться причиной образования  $\text{NO}_x$ . Дополнительным бонусом при этом является уменьшение длины камеры сгорания, таким образом, метод является перспективным.

Крайне желательно уметь увеличивать скорость распространения фронта пламени и для стабилизации сверхзвукового горения, где большое отношение скорости потока к скорости фронта пламени приводит к срыву горения. Во многих случаях пытаются стабилизировать сверхзвуковое горение путем организации отрывного течения с внезапным расширением [10]. Однако исследования [11] показали, что в таких течениях в довольно широком диапазоне параметров возможно возбуждение мощных низкочастотных колебаний, что, конечно же, совершенно нежелательно, причем возникают такие колебания в самых разных областях применения [12]. Перспективной альтернативой представляется стабилизация сверхзвукового горения экономичным глубоко подкритическим СВЧ-разрядом.

На рис. 1 приведена схема использованной для проведения экспериментов установки. Длина волны СВЧ-излучения  $\lambda=2,5$  см. Герметичная рабочая камера соединялась с объемным ресивером, который позволял получать в ней разрежение до 0,05 бар. На стенке камеры крепилось сопло Лавалья с геометрическим числом Маха на срезе  $M=2$ . Меняя степень разрежения в камере можно было изучать сверхзвуковое горение при различной скорости потока. Эксперимент показал, что на скорости  $M=2$  при отсутствии СВЧ-разряда горение пропана не происходит. При включении СВЧ-генератора происходило устойчивое продолжительное горение в сверхзвуковом потоке (рис. 2, а). Хорошо видны конусы Маха с углом при вершине  $\alpha=\arcsin 1/M$ , соответствующие  $M=2$ , и совпадающие с фронтом горения (рис. 2, б). Таким образом, подтверждена возможность обеспечения сверхзвукового горения путем создания в зоне горения экономичного глубоко подкритического разряда.

Возможность увеличения скорости горения в дозвуковом потоке изучалась на подобной установке, создающей квазиоптический СВЧ-пучок в импульсном режиме. Электромагнитный вибратор помещался внутрь шарика, надутого пропаном (рис. 3, а).

Осуществлялась съемка скоростной камерой увеличения размеров шарика в процессе воспламенения. При наличии СВЧ-разряда скорость увеличения размеров оказалась примерно в 10 раз больше. Следовательно, можно сделать вывод, что холодная неравновесная плазма, созданная глубоко подкритическим СВЧ-разрядом, способна увеличить скорость горения как минимум на порядок.

Таким образом, нами показано, что разрабатываемая технология интенсификации горения глубоко подкритическим СВЧ-разрядом является перспективной. Необходимо продолжить исследования возможности ее применения при давлениях среды, существенно больших атмосферного, что характерно для камер сгорания реактивных двигателей.

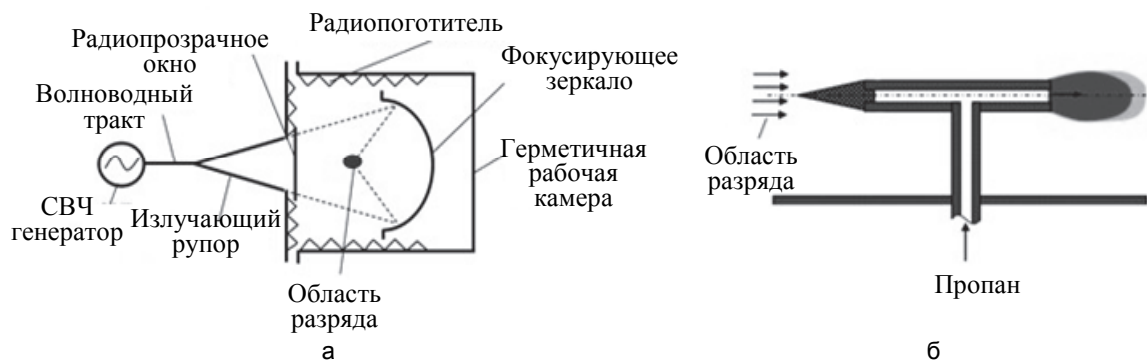


Рис. 1. Схема установки (а) для изучения возможности стабилизации сверхзвукового горения при помощи глубоко подкритического СВЧ-разряда, созданного электромагнитным вибратором (б), через который в сверхзвуковой поток подавался пропан



Рис. 2. Устойчивое горение пропана в сверхзвуковом потоке (а). Фронт горения (б) совпадает с линиями распространения возмущений в сверхзвуковом потоке с  $M=2$ . Расстояние между электромагнитными вибраторами на фрагменте (а) и конусами горения (б) 50 мм

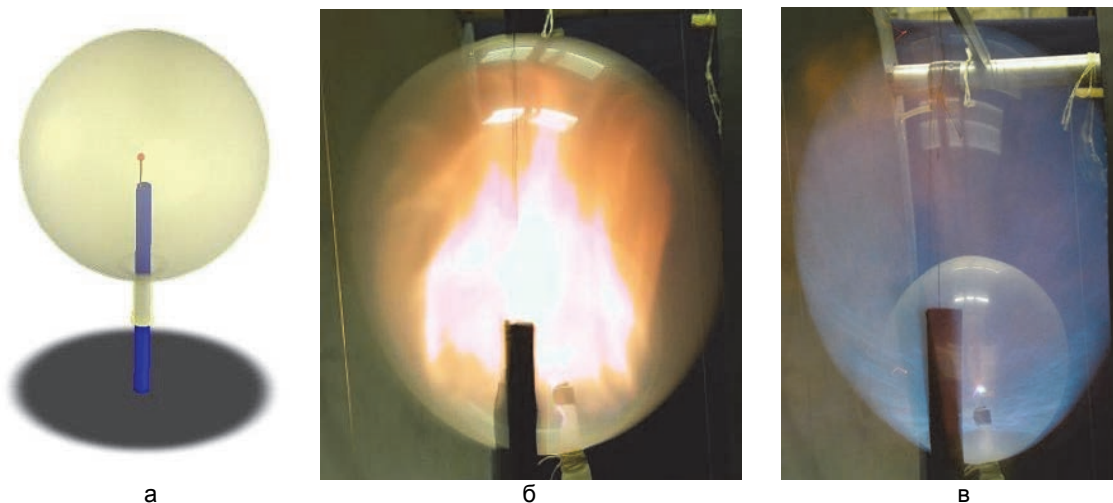


Рис. 3. Воспламенение пропано-воздушной топливной смеси, которой наполнен резиновый шарик (а). Воспламенение при наличии в области горения разряда (б) и при его отсутствии (в). Смесь подается в шарик через трубочку длиной 20 см

### Литература

1. Бычков Д.В., Грачев Л.П., Есаков И.И. Возбуждаемый полем квазиоптического электромагнитного пучка глубоко подкритический СВЧ-разряд в сверхзвуковой струе воздуха // ЖТФ. 2009. Т. 79. № 3. С. 39–45.
2. Александров К.В., Грачев Л.П., Есаков И.И., Федоров В.В., Ходатаев К.В. Области реализации различных типов СВЧ-разряда в квазиоптических электромагнитных пучках // ЖТФ. 2006. Т. 76. № 11. С. 52–60.
3. Khodataev K.V. The nature of surface MW discharges // Proc. 48<sup>th</sup> AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Exhibition. Orlando, Florida, 2010. Art. 2010-1378.

4. Bityurin V., Leonov S., Yarantsev D., Van Wie D. Hydrocarbon fuel ignition by electric discharge in high-speed flow // Proc. 4<sup>th</sup> Int. Workshop on Magnetoplasma Aerodynamics for Aerospace Applications. Moscow, 2002. P. 200.
5. Напартович А.П., Кочетов И.В., Леонов С.Б. Расчет динамики воспламенения водородно-воздушной смеси неравновесным разрядом в высокоскоростном потоке // ТВТ. 2005. Т. 43. № 5. С. 677–683.
6. Napartovich A.P., Akishev Yu.S., Deryugin A.A., Kochetov I.V., Trushkin N.I. DC glow discharge with fast gas flow for flue gas processing / In: Non-Thermal Plasma Techniques for Pollution Control. Part B: Electron Beam and Electrical Discharge Processing. Eds. B.M. Penetrante, S.E. Schultheis. Springer, 1993. P. 355–370. doi: 10.1007/978-3-642-78476-7
7. Булат П.В., Денисенко П.В., Волков К.Н. Тенденции разработки детонационных двигателей для высокоскоростных воздушно-космических летательных аппаратов и проблема тройных конфигураций ударных волн. Часть I. Исследования детонационных двигателей // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2016. Т. 16. № 1. С. 1–21. doi: 10.17586/2226-1494-2016-16-1-1-21
8. Starikovskaia S.M., Starikovskii A.Yu. Plasma assisted ignition and combustion / In: Handbook of Combustion. Eds. M. Lackner, F. Winter, A.K. Agarwal. Weinheim, Germany: Wiley-VCH, 2010. 3168 p.
9. Rakitin A.E., Popov I.B. Starikovskii A.Yu. Detonation initiation by a gradient mechanism in propane–oxygen and propane–air mixtures // Proc. 49<sup>th</sup> AIAA Aerospace Sciences Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition. Orlando, Florida, 2011.
10. Старов А.В. Определение пределов устойчивого горения при высоких сверхзвуковых скоростях потока в канале // Вестник НГУ. Серия: Физика. 2008. Т. 3. № 2. С. 47–60.
11. Булат П.В., Продан Н.В. О низкочастотных расходных колебаниях донного давления // Фундаментальные исследования. 2013. № 4–3. С. 545–549.
12. Усков В.Н., Булат П.В. Об исследовании колебательного движения газового подвеса ротора турбохолодильных и детандерных машин. Часть II. Колебания давления в соплах питающей системы на сверхкритическом режиме работы // Вестник Международной академии холода. 2013. № 1. С. 57–60.

- Булат Павел Викторович** – кандидат физико-математических наук, кандидат экономических наук, заведующий международным научным подразделением, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, pavelbulat@mail.ru
- Есаков Игорь Иванович** – доктор физико-математических наук, заместитель генерального директора, Московский радиотехнический институт РАН, Москва, 117519, Российская Федерация, esakov@mrtiran.ru
- Волобуев Игорь Алексеевич** – аспирант, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация; генеральный директор, ООО «ВНХ-Энерго», Санкт-Петербург, 198035, Российская Федерация, Volobuev\_ig@mail.ru
- Грачев Лев Петрович** – начальник отдела, Московский радиотехнический институт РАН, Москва, 117519, Российская Федерация, Esakov@mrtiran.ru
- Pavel V. Bulat** – PhD, Scientific supervisor of International laboratory, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, pavelbulat@mail.ru
- Igor I. Esakov** – D.Sc., Deputy general director, Moscow Radiotechnical Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 117519, Russian Federation, esakov@mrtiran.ru
- Igor A. Volobuev** – postgraduate, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation; CEO (Chief Executive Officer), VNH-Energo, Saint Petersburg, 198035, Russian Federation, Volobuev\_ig@mail.ru
- Lev P. Grachev** – Head of department, Moscow Radiotechnical Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 117519, Russian Federation, Esakov@mrtiran.ru