

УДК 533.9

О СКОРОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ФРОНТА ПЛАМЕНИ В ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ТРУБКЕ ПРИ МНОГООЧАГОВОМ ПОДЖИГАНИИ СТРИМЕРНЫМ СВЧ-РАЗРЯДОМ

П.В. Булат^{a,b}, И.И. Есаков^c, Л.П. Грачев^c, П.В. Денисенко^d, И.А. Волобуев^{a,e}

^a Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

^b ООО «Проблемная Лаборатория «Турбомашин», Санкт-Петербург, 198035, Российская Федерация

^c АО Московский радиотехнический институт РАН, Москва, 117519, Российская Федерация

^d Университет Уорвика, Ковентри, CV4 7AL, Великобритания

^e ООО «ВНХ-Энерго», Санкт-Петербург, 198035, Российская Федерация

Адрес для переписки: Pavelbulat@mail.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию 24.07.17, принята к печати 23.08.17

doi: 10.17586/2226-1494-2017-17-5-956-960

Язык статьи – русский

Ссылка для цитирования: Булат П.В., Есаков И.И., Грачев Л.П., Денисенко П.В., Волобуев И.А. О скорости распространения фронта пламени в цилиндрической трубке при многоочаговом поджигании стримерным СВЧ-разрядом // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2017. Т. 17. № 5. С. 956–960. doi: 10.17586/2226-1494-2017-17-5-956-960

Аннотация

Изучается скорость распространения фронта горения в кварцевой цилиндрической трубке, заполненной смесью пропана и воздуха, при объемном воспламенении стримерным разрядом. Стримерный разряд зажигается на внутренних стенках трубки квазиоптическим микроволновым излучением при помощи инициатора, помещенного в трубку. Измерения выполняются при различной длине стримерного разряда. Выполненные исследования показали, что стримерный разряд, создающий множество точек воспламенения, обеспечивает практически мгновенное воспламенение смеси во всем объеме, куда достают стримеры. Образующийся фронт горения имеет скорость, характерную для перехода дефлаграции в детонацию. Измерения показали, что скорость фронта растет с увеличением длины разряда, но нелинейно. Зависимость скорости от коэффициента избытка горючего также неоднозначная. Результаты могут найти применение при разработке систем многоочагового объемного зажигания в двигателях внутреннего сгорания, газотурбинных двигателях, малоэмиссионных камерах сгорания, для организации горения в сверхзвуковом потоке, а также в камерах сгорания детонационных двигателей.

Ключевые слова

стримерный разряд, горение, детонация, зажигание, переход дефлаграции в детонацию, скорость фронта горения, стабилизатор горения

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (Соглашение №14.578.21.0111, уникальный идентификатор прикладных научных исследований RFMEFI57815X0111).

ON FLAME FRONT PROPAGATION RATE IN CYLINDRICAL TUBE WITH MULTIPOINT IGNITION BY STREAMER MICROWAVE DISCHARGE

P.V. Bulat^{a,b}, I.I. Esakov^c, L.P. Grachev^c, P.V. Denissenko^d, I.A. Volobuev^{a,e}

^a ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

^b LLC "Problem Laboratory "Turbomachines", Saint Petersburg, 198035, Russian Federation

^c Moscow Radiotechnical Institute of Russian Academy of Sciences, Moscow, 117519, Russian Federation

^d University of Warwick, Coventry, CV4 7AL, UK

^e LLC "VNH-Energo", Saint Petersburg, 198035, Russian Federation

Corresponding author: Pavelbulat@mail.ru

Article info

Received 24.07.17, accepted 23.08.17

doi: 10.17586/2226-1494-2017-17-5-956-960

Article in Russian

For citation: Bulat P.V., Esakov I.I., Grachev L.P., Denissenko P.V., Volobuev I.A. On flame front propagation rate in cylindrical tube with multipoint ignition by streamer microwave discharge. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2017, vol. 17, no. 5, pp. 956–960 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2017-17-5-956-960

Abstract

We study the propagation rate of the combustion front in a quartz cylindrical tube filled with a mixture of propane and air with volumetric ignition by a streamer discharge. The streamer discharge is ignited on the inner walls of the tube by quasi-optical microwave radiation with an initiator placed in the tube. The measurements are performed for different lengths of the streamer discharge. The carried out studies showed that the streamer discharge, that creates a multitude of ignition points, provides practically instantaneous ignition of the mixture in the entire volume, where the streamers reach. The resulting combustion front has a speed typical for the deflagration to detonation transition. Measurements have shown that the front speed rises with discharge length increase, but it is nonlinear. The dependence of the speed on the excess fuel coefficient is also ambiguous. The results can be applied in the development of multipoint volumetric ignition systems in internal combustion engines, gas turbine engines, low-emission combustion chambers, the combustion organization in a supersonic flow, and the combustion chambers detonation engines.

Keywords

streamer discharge, combustion, detonation, ignition, deflagration to detonation transition, combustion front speed, flameholder

Acknowledgments

The work was supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (Agreement No.14.578.21.0111, unique identifier of applied scientific research RFMEFI57815X0111).

Целью настоящей работы является экспериментальное изучение скорости распространения фронта горения внутри кварцевой цилиндрической трубки, заполненной смесью пропана с воздухом, при иницировании воспламенения подкритическим стримерным сверхвысокочастотным (СВЧ) разрядом. Термин «подкритический» означает, что напряженность электрического поля в области разряда меньше напряженности пробоя воздуха [1, 2]. Основные сведения о стримерных подкритических разрядах приведены в работах [3, 4]. Во многих задачах двигателестроения актуальным является увеличение скорости сжигания топлива [5], что приводит к повышению удельной мощности двигателя, снижению выбросов оксидов азота NO_x [6], улучшению экономичности за счет возможности сжигать особо бедные топливные смеси с большим избытком воздуха. Увеличение скорости горения в присутствии объемного СВЧ-разряда позволяет его использовать в системах зажигания [7] и стабилизаторах горения в высокоскоростных потоках [8]. Перспективным представляется использование стримерных разрядов в конструкции импульсно-детонационных двигателей [9], так как объемный разряд существенно увеличивает скорость распространения фронта горения и сокращает путь перехода дефлаграции в детонацию (Deflagration to Detonation Transition, DDT) [10].

В настоящей работе изучается зажигание стримерным разрядом и последующее горение в трубке топливной смеси пропана с воздухом. Для иницирования разряда используется установка, схема которой приведена на рис. 1, а. Генератор создает электромагнитные (ЭМ) колебания с частотой $f \approx 3,4 \cdot 10^9$ Гц или длиной волны $\lambda = 8,9$ см. Длительность СВЧ-импульса $\tau_{\text{имп}} = 40$ мкс. Прошедшая через полистироловую линзу ЭМ волна излучается на осесимметричное металлическое вогнутое сферическое зеркало с радиусом кривизны $R = 450$ мм, диаметром 685 мм и глубиной 158 мм. Отразившись от зеркала, волна фокусируется на оси системы на расстоянии $R/2 = 225$ мм от осевой точки сферической поверхности зеркала или на расстоянии $h = 67$ мм от плоскости его раскрытия. Таким образом, формируется пучок со сравнительно резкими границами, по свойствам напоминающий обычный оптический луч, поэтому он называется квазиоптическим.

В область фокусирования квазиоптического пучка помещалась кварцевая трубка (рис. 1, б), один конец которой был заглушен, а второй оставался открытым. На открытый конец трубки надевался резиновый шарик (рис. 1, в). К заглушке подводились две трубки. Через одну из трубок откачивался воздух, а через другую подавался пропан. Изменяя парциальные давления, можно было регулировать соотношение топливо/окислитель. Эксперименты проводились со стехиометрическими, бедными (отношение топливо/окислитель 0,87) и богатыми (отношение топливо/окислитель 1,33) смесями. Чтобы при откачивании воздуха шарик не лопался, на срез трубки одевалась защитная диафрагма (рис. 1, г). На расстоянии 27 мм от заглушенного конца трубки помещался инициатор разряда, который представлял собой полуволновой вибратор. При подаче генератором импульса на концах инициатора зажигался стримерный разряд, который занимал всю внутреннюю образующую внутренней цилиндрической поверхности трубки (рис. 2, а), и затем бежал навстречу излучению (рис. 2, б). На рис. 2, б, хорошо видны голубые точки на концах инициатора, от которых распространяется стримерный разряд сиреневого цвета.

Длина разряда регулировалась смещением трубки из фокуса СВЧ-пучка. При помещении инициатора точно в фокусе (рис. 1, а, трубка не показана) длина разряда получалась около 180 мм. По мере удаления от фокуса длина разряда уменьшалась. В большинстве экспериментов трубка располагалась открытым концом к зеркалу. Но при некотором удалении инициатора от фокуса шарик, надетый на открытый конец трубки, уже не помещался между зеркалом и трубкой, поэтому трубка разворачивалась закрытым концом к зеркалу. Поскольку это имело место только при значительном удалении инициатора от фокуса, то длина разряда была небольшой, и то, в какую сторону бежал разряд, не оказывало особого влияния на скорость распространения фронта горения. При помещении инициатора вблизи фокуса ско-

рости фронта горения при различной ориентации трубки отличались более чем в два раза. Измерение длины разряда и скорости распространения фронта горения производилось путем покадровой обработки видео, снятого со скоростью 1200 кадров/с.

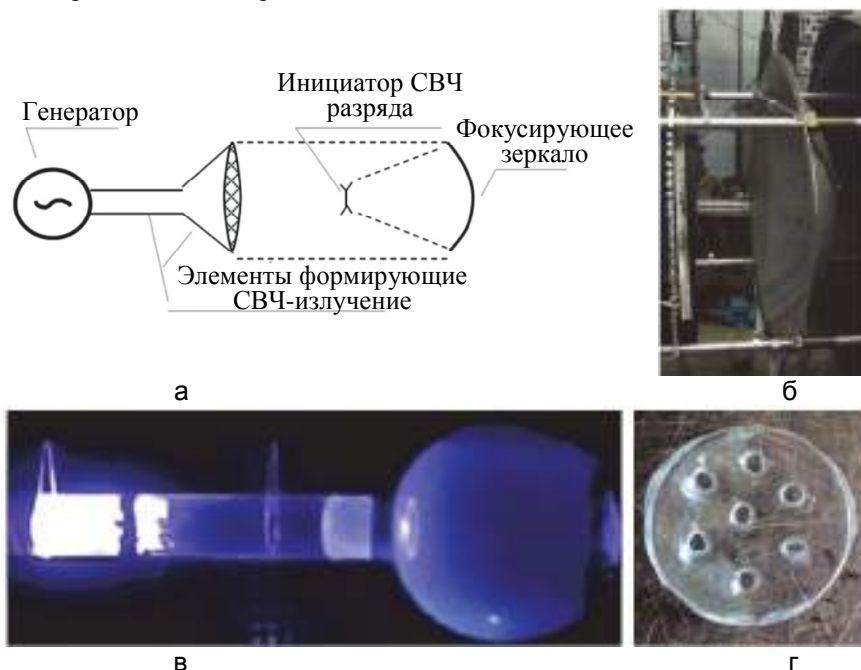


Рис. 1. Схема проведения эксперимента. Экспериментальная установка (а), по оси симметрии которой в области фокусирования СВЧ-излучения помещалась кварцевая трубка (б). На открытый конец трубки одевался резиновый шарик (в), отделявший топливную смесь от окружающей среды, а также защитная мембрана из полистирола (г), предотвращавшая повреждение шарика при откачивании воздуха из трубки.

Длина волны СВЧ-излучения $\lambda = 8,9$ см, Длительность СВЧ-импульса $T_{\text{имп}} = 40$ мкс, диаметр зеркала 685 мм, длина трубки 500 мм, внутренний диаметр трубки 30 мм

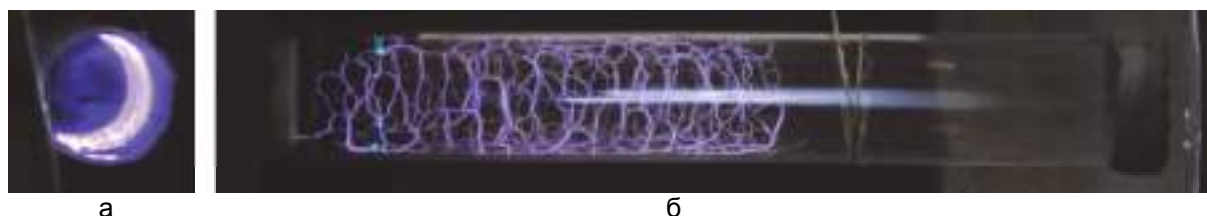


Рис. 2. Стримерный разряд, зажженный на внутренней поверхности кварцевой трубки: вид с торца (а); вид сбоку (б). Диаметр трубки 30 мм. Точки голубого цвета – разряд на концах инициатора. Длина трубки 500 мм, внутренний диаметр трубки 30 мм

На рис. 3 представлены результаты эксперимента. Точками показаны данные эксперимента, сплошными линиями – линии тренда. Путем повторения экспериментов при одних и тех же исходных данных была выявлена невысокая повторяемость формы и длины разряда, которые сильно зависят от множества случайных факторов. Неопределенность находится на уровне 20%. Разброс данных на рис. 3 представлен диапазонами погрешностей по осям абсцисс и ординат.

При развитом разряде (длины более 0,15 м) скорость распространения фронта пламени наибольшая у богатой смеси и убывает по мере уменьшения доли горючего. По мере удаления инициатора от фокуса область, занятая разрядом, уменьшается. При этом наблюдается иная тенденция – скорость распространения фронта выше в стехиометрической смеси. Скорость распространения фронта в бедной смеси всегда меньше, чем в стехиометрической и богатой (на рис. 3 показаны данные только одного эксперимента).

В ходе описанных выше экспериментов, по-видимому, впервые в мире удалось получить устойчивое зажигание подкритического стримерного разряда на внутренней поверхности цилиндрической трубки из диэлектрика, а также инициировать с его помощью воспламенение топливной смеси. Продемонстрирована возможность получения скоростей горения на уровне сотен метров в секунду, что характерно для переходных режимов DDT. Исследована зависимость скорости горения от длины области, занятой разрядом, а также соотношения топлива и окислителя.

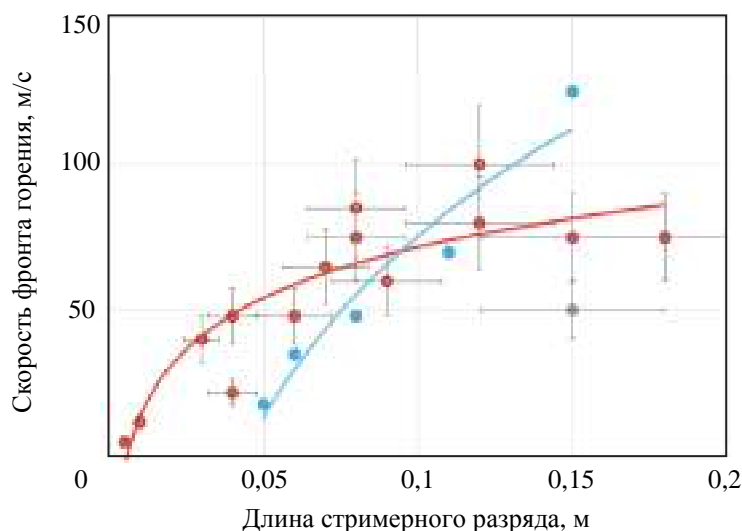


Рис. 3. Зависимость скорости распространения фронта пламени в кварцевой трубке, заполненной смесью пропана с воздухом, от длины стримерного разряда, зажженного на ее внутренней поверхности.

- – стехиометрическое соотношение пропан/воздух, ● – богатая смесь, коэффициент избытка горючего 1,33, ○ – бедная смесь, коэффициент избытка горючего 0,87. ┆ ┆ – погрешности

Полученные данные продемонстрировали перспективность использования стримерного зажигания для ускорения процесса DDT, а также для применения в устройствах, где требуется существенное увеличение скорости горения, например, в стабилизаторах горения в скоростных и сверхзвуковых потоках.

Литература

1. MacDonald A.D. *Microwave Breakdown in Gases*. New York-London-Sydney: John Wiley & Sons, 1966.
2. Ходатаев К.В. Порог пробоя в СВЧ-поле при низком и высоком давлениях в электроотрицательных газовых смесях // ЖТФ. 2013. Т. 83. № 2. С. 146–148.
3. Khodataev K.V. The nature of surface MW discharges // Proc. 48th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibition. Orlando, Florida, 2010. doi: 10.2514/6.2010-1378
4. Булат П.В., Есаков И.И., Грачев Л.П., Денисенко П.В., Булат М.П., Волобуев И.А. Математическое и компьютерное моделирование горения и детонации подкритическим стримерным разрядом // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2017. Т. 17. № 4. С. 569–592. doi: 10.17586/2226-1494-2017-17-4-569-592
5. 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
6. Булат П.В., Булат М.П., Есаков И.И., Волобуев И.А., Грачев Л.П., Денисенко П.В. Экологически чистый способ сжигания газообразного топлива с применением квазиоптического СВЧ-излучения // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2016. Т. 16. № 3. С. 513–523. doi: 10.17586/2226-1494-2016-16-3-513-523
7. Dryer F.L., Ju Y. University Capstone Project: Enhanced Initiation Techniques for Thermochemical Energy Conversion. Final Report AFRL-OSR-VA-TR-2013-0126, 2013.
8. Чернышев С.Л., Скворцов В.В., Иванов В.В., Трошиненко Г.А. Концепция создания и применения объемноцентрированного неравновесного разряда для поджига и интенсификации горения топлив в высокоскоростных потоках // Авиационная промышленность. 2013. №2. С. 19–25.
9. Булат П.В., Денисенко П.В., Волков К.Н. Тенденции разработки детонационных двигателей для высокоскоростных воздушно-космических летательных

References

1. MacDonald A.D. *Microwave Breakdown in Gases*. New York-London-Sydney, John Wiley & Sons, 1966.
2. Khodataev K.V. Breakdown threshold in the microwave field at low and high pressures in electronegative gas mixtures. *Technical Physics. The Russian Journal of Applied Physics*, 2013, vol. 58, no. 2, pp. 294–297. doi: 10.1134/S1063784213020126
3. Khodataev K.V. The nature of surface MW discharges. *Proc. 48th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibition*. Orlando, Florida, 2010. doi: 10.2514/6.2010-1378
4. Bulat P.V., Esakov I.I., Grachev L.P., Denissenko P.V., Bulat M.P., Volobuev I.A. Modeling and simulation of combustion and detonation by subcritical streamer discharge. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2017, vol. 17, no. 4, pp. 569–592. (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2017-17-4-569-592
5. 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. (In Russian). doi:10.17586/2226-1494-2016-16-2-382-385
6. Bulat P.V., Bulat M.P., Esakov I.I., Volobuev I.A., Grachev L.P., Denissenko P.V. Environmentally friendly method of gaseous fuel combustion with the use of quasi-optical microwave. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2016, vol. 16, no. 3, pp. 513–523. (In Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2016-16-2-513-523
7. Dryer F.L., Ju Y. *University Capstone Project: Enhanced Initiation Techniques for Thermochemical Energy Conversion*. Final Report AFRL-OSR-VA-TR-2013-0126, 2013.
8. Chernyshev S.L., Skvortsov V.V., Ivanov V.V., Troshchenko G.A. A concept for generation and application of body-centered non-equilibrium discharge for initiation and intensification of fuel combustion in high-speed flows. *Aviatsionnaya Promyshlennost'*, 2013, no. 2, pp. 19–25. (In Russian).
9. Bulat P.V., Denissenko P.V., Volkov K.N. Trends in the development of detonation engines for high-speed aerospace aircrafts and the problem of triple configurations of shock

- 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
10. Starikovskiy A., Aleksandrov N., Rakitin A. Plasma-assisted ignition and deflagration-to-detonation transition // Proc. 53rd AIAA Aerospace Sciences Meeting. Kissimmee, Florida, 2015. doi: 10.2514/6.2015-1601
- waves. Part I. Research of detonation engines. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2016, vol. 16, no. 1, pp. 1–21. (In Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2016-16-1-1-21
10. Starikovskiy A., Aleksandrov N., Rakitin A. Plasma-assisted ignition and deflagration-to-detonation transition. *Proc. 53rd AIAA Aerospace Sciences Meeting*. Kissimmee, Florida, 2015. doi: 10.2514/6.2015-1601

Авторы

Булат Павел Викторович – доктор физико-математических наук, кандидат экономических наук, заведующий международным научным подразделением «Лаборатория механики и энергетических систем», Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация; генеральный директор, ООО «Проблемная лаборатория «Турбомашини», Санкт-Петербург, 198035, Российская Федерация, Pavelbulat@mail.ru

Есаков Игорь Иванович – доктор физико-математических наук, заместитель генерального директора по научной работе, АО Московский радиотехнический институт РАН, Москва, 117519, Российская федерация, esakov@mrtiran.ru

Грачев Лев Петрович – начальник отдела, АО Московский радиотехнический институт РАН, Москва, 117519, Российская федерация, Esakov@mrtiran.ru

Денисенко Петр Валерьевич – доктор философии, доцент, Университет Уорик, Ковентри, CV4 7AL, Великобритания, p.denissenko@gmail.com

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

Authors

Pavel V. Bulat – D.Sc., PhD, Head of the International Research Unit "Laboratory of mechanics and energy systems", ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation; Chief Executive Officer, LLC "Problem Laboratory "Turbomachines", Saint Petersburg, 198035, Russian Federation, Pavelbulat@mail.ru

Igor I. Esakov – D.Sc., Deputy General Director for scientific work, Moscow Radiotechnical Institute of Russian Academy of Sciences, Moscow, 117519, Russian Federation, esakov@mrtiran.ru

Lev P. Grachev – Head of plasma research department, Moscow Radiotechnical Institute of Russian Academy of Sciences, Moscow, 117519, Russian Federation, Esakov@mrtiran.ru

Petr V. Denissenko – PhD, Associate Professor, Warwick University, Coventry, CV4 7AL, United Kingdom, p.denissenko@gmail.com

Igor A. Volobuev – postgraduate, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation; Chief Executive Officer, LLC "VNH-Energo", Saint Petersburg, 198035, Russian Federation, Volobuev_ig@mail.ru