

СРОЧНОЕ СООБЩЕНИЕ

УДК 536.46;533.98

ИНИЦИИРОВАНИЕ ГОРЕНИЯ ОПТИЧЕСКИМ РАЗРЯДОМ
В СВЕРХЗВУКОВОЙ МЕТАНОВОЗДУШНОЙ СТРУЕВ. Н. Зудов¹, Г. Н. Грачев², В. Л. Крайнев¹,
А. Л. Смирнов², П. К. Третьяков¹, А. В. Тупикин^{1,3}¹Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН, 630090 Новосибирск, zudov@itam.nsc.ru²Институт лазерной физики СО РАН, 630090 Новосибирск³Новосибирский государственный университет, 630090 Новосибирск

Проведены первые экспериментальные исследования воздействия лазерной плазмы, создаваемой сфокусированным импульсно-периодическим излучением СО₂-лазера, на формирование и развитие горения в сверхзвуковом потоке гомогенных метановоздушных смесей. Результаты спектрозональной регистрации свидетельствуют о принципиальной возможности инициирования горения оптическим разрядом. Сформулированы условия, необходимые для стабилизации горения.

Ключевые слова: оптический разряд, гомогенное горение, сверхзвуковая нерасчетная струя, спектрозональная регистрация.

Возросший в настоящее время интерес к возможности управления процессом горения путем внешнего энергетического воздействия обусловлен повышением требований к содержанию вредных примесей в продуктах сгорания технологических устройств, в том числе двигателей различного назначения. В энергетических установках со сверхзвуковой скоростью потока возникают принципиальные трудности, связанные с воспламенением топливовоздушных смесей при давлениях $p = 1 \div 10$ бар [1, 2]. Сформировался ряд направлений фундаментального характера по исследованию внешнего энергетического воздействия на до- и сверхзвуковое течение топливовоздушных смесей. Развиваются различные способы энергетического воздействия путем создания плазменных объектов в движущихся реакционноспособных средах. Для воспламенения в потоке

горючих смесей используются электрические разряды различного типа (тлеющего, дугового, микроволнового, барьерного и т. п.) [1] и сфокусированное лазерное излучение, включая оптический пробой среды [2–5]. Применение лазерного излучения для этих целей представляет особый интерес как для фундаментальных исследований, так и для ряда возможных практических приложений [6]. В обзоре [2] рассмотрены основные принципы воспламенения и стабилизации горения оптическим разрядом в покоящихся и медленно движущихся средах (до 30 м/с). Возможность значительного расширения пределов стабилизации горения в область бедных смесей при высоких скоростях потока (более 100 м/с) была показана в [5] на примере стабилизации горения водорода. В [2] отмечается, что наименее изученной остается область сверхзвуковых скоростей в диапазоне давлений $1 \div 10$ бар, что представляет интерес для силовых установок высокоскоростных летательных аппаратов.

Качественным отличием данной работы является экспериментальная реализация ини-

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 12-01-00830-а).

© Зудов В. Н., Грачев Г. Н., Крайнев В. Л., Смирнов А. Л., Третьяков П. К., Тупикин А. В., 2013.

цирования горения в сверхзвуковом потоке при давлениях порядка 1 бар. Необходимо отметить, что в литературе отсутствуют работы по изучению возможностей применения оптического разряда для воспламенения и управления горением в сверхзвуковом потоке.

Для образования лазерной плазмы оптического пульсирующего разряда в данной работе применялся электроразрядный CO_2 -лазер ЛОК-ЗСГУ [7], который обеспечивал импульсно-периодический режим излучения с частотой следования импульсов до 60 кГц и средней мощностью до 2.5 кВт. Излучение CO_2 -лазера распространялось поперек потока и фокусировалось линзой из ZnSe ($f = 63$ мм) на оси сверхзвуковой струи (число Маха $M = 2$) на заданном расстоянии от среза сопла. Гомогенная метановоздушная смесь с коэффициентом избытка воздуха $\alpha \approx 0.9$ истекала в затопленное пространство (степень нерасчетности $n = 0.7$). Для регистрации структуры течения применялась теневая схема со щелью и плоским ножом, расположенным вдоль потока. Изображение фиксировалось скоростной камерой со временем экспозиции 1.5 мкс и частотой кадров 1000 с^{-1} . Велась спектрзональная съемка на длине волны излучения радикала ОН. Применялась камера высокого пространственного разрешения с усилителем изображения, с частотой кадров 10 с^{-1} и экспозицией 0.8 мс. Во избежание засветки от разряда область регистрации находилась ниже по потоку от места пробоя.

Форма импульса падающего излучения (ИК-фотоприемник ФД-511-2, спектральный

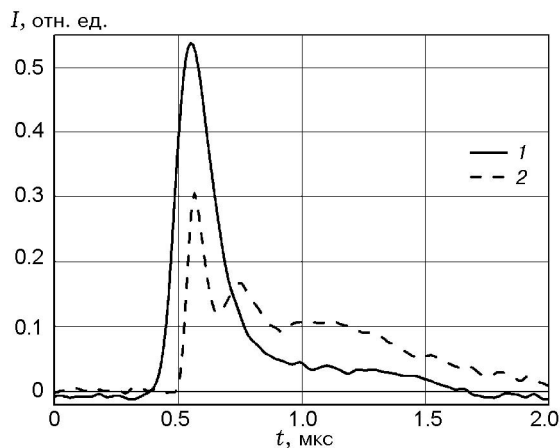


Рис. 1. Форма импульса падающего излучения (1) и сигнал излучения плазмы оптического разряда (2)

диапазон до 11 мкм) и сигнал излучения плазмы оптического разряда (фотоприемник ФД 256, $0.4 \div 1.1$ мкм) представлены на рис. 1. Наличие двух максимумов в сигнале излучения плазмы связано с движением фронта волны горения оптического разряда из области оптического пробоя навстречу лучу и с соответствующим изменением условий фокусировки на фотоприемник ФД 256.

В воздушном потоке каждый лазерный импульс приводил к образованию плазмы, а добавка метана — к $1.5 \div 2$ -кратному увеличению порога оптического пробоя метановоздушной среды. Поэтому в метановоздушной струе не всегда реализовывался пробой при тех же параметрах излучения. При изучении воспламенения смеси из серии опытов выбирались режимы, в которых пробой осуществлялся в нескольких последовательных импульсах. Необходимо отметить, что не всегда наблюдалась корреляция между падающим лазерным излучением и излучением от плазмы. По-видимому, это связано с тем, что опыты проводились при энергии лазерного излучения, близкой к порогу пробоя метановоздушной среды.

Как показано в [8], условия стабилизации оптическим разрядом и отрывной зоной за плохообтекаемым телом одинаковы. Для осуществления квазистационарного режима подвода энергии необходимо, чтобы за время между соседними импульсами плазма существенно не распадалась и не сносилась потоком газа [9]. В опытах был реализован слабо перерасширенный режим истечения струи из сопла, в котором наблюдался диск Маха. Оптический разряд зажигался в различных областях сверхзвуковой струи; в частности, на рис. 2, а показана структура течения при реализации разряда перед диском Маха. Частота следования лазерных импульсов $f = 60$ кГц при длительности ≈ 1 мкс. В структуре течения наблюдаются отдельные тепловые неоднородности, сносимые потоком. Расстояние между областями последовательных пробоев (кавернами оптических разрядов) составляет 3–4 мм. Скорость потока перед диском Маха $u_1 \approx 500$ м/с, а за ударной волной $u_2 \approx 180$ м/с. За время между импульсами среда в потоке смещается на расстояние $u_2/f = 3$ мм. Видимый поперечный размер оптического разряда $\Delta \approx 1.2$ мм. Для обеспечения квазистационарного режима взаимодействия разряда с потоком необходима частота

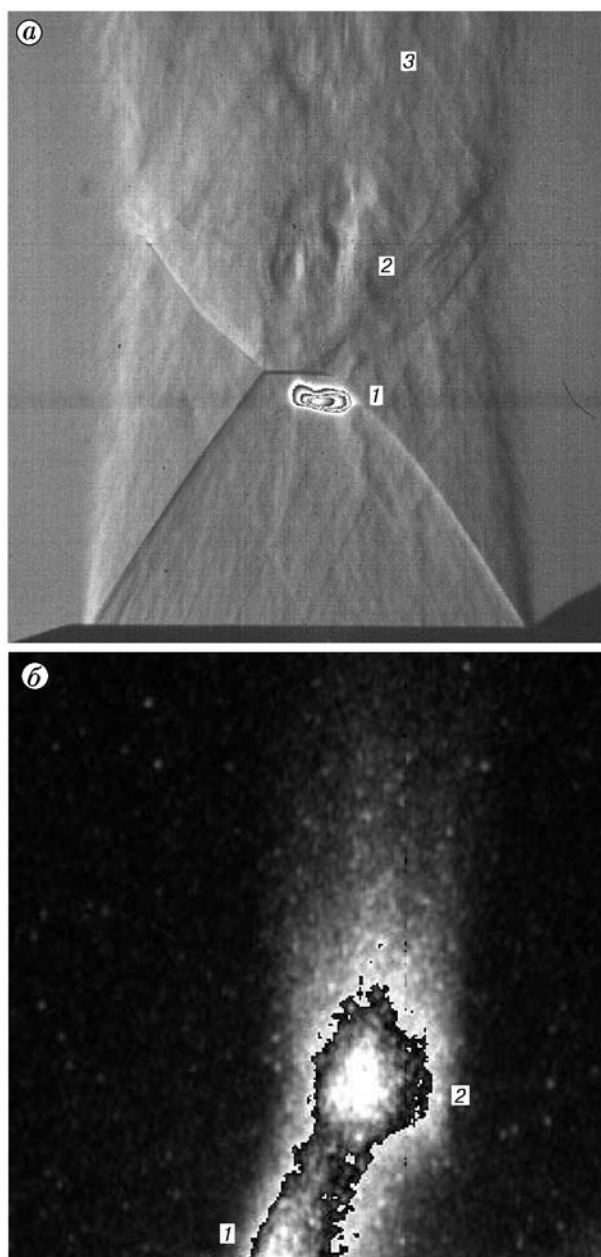


Рис. 2. Теневая регистрация (оптический разряд (1) и тепловые неоднородности (2, 3) от импульсов) (а). Спектрозональная регистрация (б) в следе за разрядом (1 — часть области оптического разряда, 2 — область горения в следе)

следования импульсов $f_{кр} \approx 150$ кГц. При взаимодействии с диском Маха плазма разряда разделяется на две части, что связано с ее пространственной неоднородностью. Ниже по потоку от места фокусировки тепловые каверны от разрядов сливаются, образуя квазинепрерывный тепловой след. Режим с частотой

$f = 60$ кГц, реализованный в эксперименте, был близок к переходу в квазистационарный.

В потоке без добавления метана в следе за оптическим разрядом излучение на длине волны радикала ОН отсутствует. Пример спектрозональной регистрации приведен на рис. 2, б. На снимке наблюдаются два пространственных максимума интенсивности свечения. Первый из них соответствует протеканию химических реакций в высокотемпературной области разряда, а второй свидетельствует о протекании горения в следе. Расстояние от места фокусировки лазерного луча до второго максимума $l \approx 15 \div 17$ мм, т. е. время задержки воспламенения составляет $\Delta t \approx 10^{-4}$ с.

Итак, в работе впервые экспериментально показана возможность воспламенения оптическим разрядом метановоздушной смеси при сверхзвуковом истечении в затопленное пространство. Результаты спектрозональной съемки свидетельствуют о протекании реакций горения в следе за областью оптического разряда. Необходимым условием стабилизации горения является квазистационарный режим взаимодействия лазерного излучения с потоком.

ЛИТЕРАТУРА

1. Leonov S. B., Yarantsev D. A. Plasma-induced ignition and plasma-assisted combustion in high-speed flow // *Plasma Sources Sci. Technol.* — 2007. — V. 16. — P. 132–138.
2. Tran X. Phuoc. Laser-induced spark ignition fundamental and applications (Review) // *Optics and Lasers in Eng.* — 2006. — V. 44. — P. 351–397.
3. Starik A., Lukhovitskii B. Mechanisms of the IR laser initiation of combustion in a supersonic $H_2/O_3/O_2$ flow // *Kinet. Catal.* — 2006. — V. 47. — P. 333–340.
4. Третьяков П. К., Тупикин А. В., Зудов В. Н. Воздействие лазерного излучения и электрического поля на горение углеводородовоздушных смесей // *Физика горения и взрыва.* — 2009. — Т. 45, № 4. — С. 77–85.
5. Tretyakov P. K. et al. Application of an optical pulsed discharge for stabilization of the hydrogen/air flame // *Proc. XIII Intern. Conf. on the Methods of Aerophysical Research, Novosibirsk, 9–16 July 2000.* — Pt II. — P. 184–188.
6. Pat. N 6514069 B1, USA, 4 Feb. 2003. Laser Ignition / J. W. Early, Ch. S. Lester.
7. Багаев С. Н., Грачев Г. Н., Пономаренко А. Г. и др. Лазерный плазмохимический синтез наноматериалов в скоростных потоках газов, первые результаты и перспективы развития метода // *Наука и нанотехнологии.* — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2007. — С. 123–135.

8. **Tretyakov P. K., Vorontsov S. S., Tupikin A. V.** Effect of pulse-periodic CO₂-laser radiation on premixed combustion of hydrocarbon fuels: Nonequilibrium processes // *Combust. Flame.* — 2005. — V. 1. — P. 74–83.
9. **Зудов В. Н., Третьяков П. К., Тупикин А. В., Яковлев В. И.** Обтекание теплового источника сверхзвуковым потоком // *Изв. РАН. МЖГ.* — 2003. — № 5. — С. 140–153.

Поступила в редакцию 8/IX 2012 г.
