

УДК 536.46; 533.98

ИНИЦИИРОВАНИЕ ГОМОГЕННОГО ГОРЕНИЯ В ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ СТРУЕ СОВМЕСТНЫМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ ОПТИЧЕСКОГО И ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО РАЗРЯДОВ

В. Н. Зудов¹, А. В. Тупикин²

¹Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН, 630090 Новосибирск, zudov@itam.nsc.ru

²Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, 630090 Новосибирск

Проведено экспериментальное исследование инициирования горения в сверхзвуковом потоке водородовоздушной смеси при одновременном воздействии сфокусированного импульсно-периодического излучения CO₂-лазера и внешнего электрического поля. На основе данных о собственном свечении пламени на длинах волн излучения возбужденных радикалов OH* исследовано горение в сверхзвуковой струе. Инициирование горения смеси зависело от формы электродов и электрических сигналов. Пламя, занимающее все сечение топливовоздушной струи, было реализовано только в условиях одновременного воздействия лазерного излучения и электрического поля. Таким образом, совместное использование оптического и электрического разрядов позволило инициировать горение и стабилизировать пламя водородовоздушной смеси в сверхзвуковом потоке без механических стабилизаторов.

Ключевые слова: оптический и электрический разряды, гомогенное горение, сверхзвуковая нерасчетная струя, спектроскопическая регистрация, теневая регистрация.

DOI 10.15372/FGV20230102

ВВЕДЕНИЕ

Воспламенение и стабилизация горения в высокоскоростных воздушных потоках является важным элементом рабочего процесса в камерах сгорания (КС) высокоскоростных летательных аппаратов (ЛА) [1–4]. Для решения вопросов, возникающих при разработке КС современных ЛА, сформировался ряд направлений фундаментального характера по исследованию внешнего энергетического воздействия на до- и сверхзвуковое течение топливовоздушных смесей [5]. Для воспламенения в потоке горючих смесей предложено использовать различного типа электрические разряды (тлеющий, дуговой, микроволновый, барьерный и т. п.) и оптический разряд. Применение оптического разряда для воспламенения и стабилизации горения в двигательных установках увеличивает генерацию активных радикалов, ионов и электронов, которые могут существенно увеличить скорость химических реакций, участвующих в горении [4, 6–10]. Такой подход был проверен в разнообразных приложениях: горелочные устройства, двигатели внут-

реннего сгорания [11], воспламенение жидких и твердых топлив, воспламенение за стабилизаторами при сверхзвуковых скоростях [3] и т. п.

В [1] 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 [10] на примере стабилизации горения водорода. Из обзора [1] следует, что наименее изученной остается область сверхзвуковых скоростей в диапазоне давлений выше 1 атм. Исследование процессов горения в этих диапазонах скоростей и давлений представляет значительный интерес для КС двигателей высокоскоростных ЛА [3, 8–10, 12, 13]. Применение плазменных источников может создать условия для обеспечения объемного и быстрого воспламенения топливовоздушной смеси за счет эффективной наработки радикалов.

Некоторые вопросы по лазерному воспламенению топливовоздушных смесей рассмотрены в [14–18]. В работе [15] для воспламенения использовался наносекундный лазер на длинах волны 1064, 248 и 193 нм, проведено сравне-

ние с воспламенением электрической искрой. Показано, что лазерное воспламенение может значительно ускорить процесс воспламенения, при этом не наблюдается зависимости от длины волны лазерного излучения.

Использование плазмы для инициирования и стабилизации горения потенциально может уменьшить необходимость в механических стабилизаторах пламени. За механическими стабилизаторами пламени, как правило, устанавливаются устойчивые дозвуковые зоны горения, которые стабилизируют горение в спутном сверхзвуковом потоке. С увеличением скорости потока стабилизация горения ухудшается [8, 12]. Дополнительное введение инжектора или стабилизатора в сверхзвуковую КС приведет к увеличению потерь полного давления, которые возрастают с увеличением скорости набегающего потока.

Стабильная плазма в газовом потоке может быть сформирована, когда локальная плотность сфокусированного лазерного излучения становится порядка 10^{10} Вт/см² [1, 2]. В литературе есть описание четырех различных механизмов взаимодействия лазерного излучения с горючей смесью, приводящих к воспламенению: тепловое иницирование, фотохимическое воспламенение, резонансный пробой, нерезонансный пробой [1–4]. Эффективность каждого механизма зависит от различных параметров, в том числе от длины волны лазерного луча. Нерезонансный пробой является наиболее часто используемым режимом воспламенения для зажигания в потоке [1, 2]. Длительное квазистационарное воздействие на структуру сверхзвукового течения может быть осуществлено при использовании СО₂-лазера. Его преимущества в экспериментальном моделировании связаны с возможностью формирования импульсно-периодического режима генерации с высокой частотой следования импульсов в течение длительного, практически неограниченного времени [9, 10, 19, 20], что было продемонстрировано в работе [19] путем использования импульсно-периодического излучения СО₂-лазера со средней мощностью $1 \div 2.5$ кВт и частотой следования импульсов $f = 12 \div 100$ кГц. Лазерное излучение фокусировалось на оси сверхзвукового потока аргона, истекающего из сопла с расчетным числом Маха $M = 2$, при статическом давлении 0.6 атм. Интенсивности излучения было достаточно для оптического пробоя среды, и в потоке формировалась

плазменная область, пульсирующая с частотой следования лазерных импульсов.

Возможность применения оптического разряда для инициирования горения при сверхзвуковых скоростях была продемонстрирована в [9, 10], но параметры лазерного излучения не позволили организовать в опытах квазистационарный режим горения оптического разряда. Для перехода к такому режиму требуется увеличить либо частоту следования импульсов, либо размеры плазменного образования, что достаточно сложно сделать. Пространственные размеры области энергетического воздействия могут быть расширены за счет наложения электрического поля, результатом которого будут электрические разряды, создающие дополнительные плазменные области [21].

В работе представлены результаты исследования инициирования горения и стабилизации водородовоздушного пламени в сверхзвуковой затопленной струе при совместном воздействии плазмой оптического разряда и электрическим полем высокой напряженности. Термодинамические параметры входящей в область гомогенной смеси далеки от режима самовоспламенения. При этом наложение электрического поля с заданной в опытах напряженностью не приводило к пробоя струи.

ЭКСПЕРИМЕНТ

Для образования лазерной плазмы оптического пульсирующего разряда (ОПР) применялся электроразрядный СО₂-лазер ЛОК-ЗГУ (разработка Института лазерной физики СО РАН), который в опытах обеспечивал импульсно-периодический режим излучения с частотой следования импульсов до 40 кГц и средней мощностью до 900 Вт. В экспериментах было использовано два режима работы лазера: первый (стандартный) — импульсно-периодический, второй — пакетный. Во втором режиме частота в пакете была задана $f_1 = 30 \div 40$ кГц, частота следования пакетов $f_2 = 3 \div 4$ кГц (в пакете $3 \div 6$ импульсов).

Излучение СО₂-лазера распространялось поперек потока и фокусировалось линзой из ZnSe на оси струи, на заданном расстоянии от среза сопла. В ходе эксперимента применялись линзы с различным фокусным расстоянием ($f = 95, 125$ мм).

Схема эксперимента представлена на рис. 1. При мощности лазера, превышающей

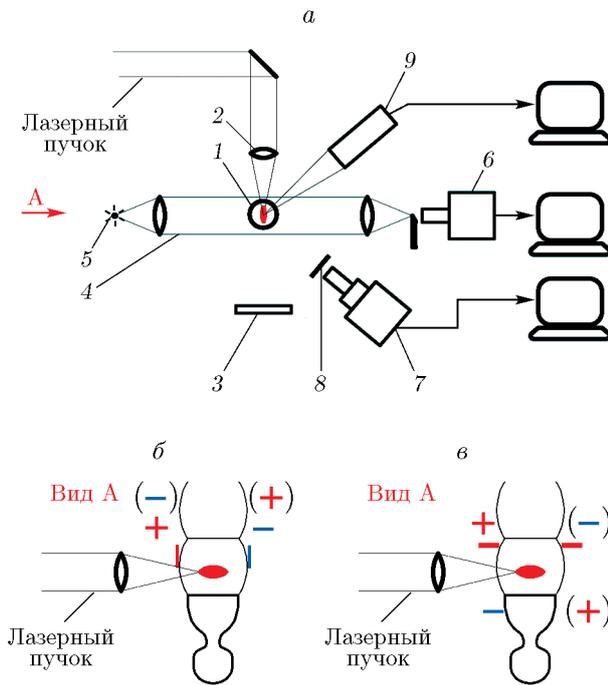


Рис. 1. Схема эксперимента:

a: 1 — горелка (сверхзвуковое сопло), 2 — фокусирующая линза, 3 — поглотитель, 4 — шлин-система, 5 — источник света, 6 — фотокамера, 7 — высокоскоростная камера, 8 — интерференционный фильтр, 9 — CCD-камера; *б*, *в* — вид А, расположение электродов: *б* — поле поперек потока, *в* — поле по потоку

пороговое значение, в фокусе за линзой в потоке зажигался ОПР. Расстояние от среза сопла до места формирования оптического разряда было 14 мм и в ходе экспериментов изменялось незначительно. Воздух и водород подавались в форкамеру по системе подачи газов, оборудованной запорно-регулирующей арматурой и участками измерения расходов. Внутренний диаметр форкамеры 80 мм, длина 95 мм. Для формирования потока газа использовалось коническое сопло, рассчитанное на число Маха $M = 1.4$. Гомогенная водородо-воздушная смесь с коэффициентом избытка воздуха $\alpha = 0.9$ истекала в затопленное воздушное пространство. Максимальное давление в форкамере $p^* = 0.8$ МПа, температура 290 К. Для регистрации структуры течения применялась теневая схема со щелью и плоским ножом, расположенным вдоль потока. В приборе Теплера для подсветки применялся искровой источник (экспозиция 10^{-6} с). Изображение фиксировалось скоростной камерой со временем экспозиции 1.5 мкс и частотой

кадров 1000 с^{-1} . Это позволило с высоким разрешением зарегистрировать внутреннюю структуру сверхзвуковой затопленной струи, которая состояла из скачков уплотнения, плазмоида и тепловых неоднородностей в следе за ОПР.

Для получения данных о структуре зоны горения применялась спектральная съемка на длине волны излучения радикала OH^* . Для этого была задействована камера Imager intense CCD (см. рис. 1, поз. 7) с динамическим диапазоном 12 бит, пространственным разрешением 1376×1040 пиксель, частотой кадров 10 Гц, с граббером PC PCI, минимальной экспозицией 1 мкс.

Измерение расхода газов проводилось регуляторами расхода Bronkhorst ElFlow (с точностью не хуже 1 %). В качестве топлива использовался водород.

В эксперименте регистрировались форма импульса падающего излучения и его временные характеристики при различных частотах. Форма импульса падающего излучения фиксировалась ИК-фотоприемником ФД-511-2 (спектральный диапазон до 11 мкм). Излучение плазмы оптического разряда фиксировалось фотоприемником ФД-256, $0.4 \div 1.1$ мкм.

Длительность лазерных импульсов ($\tau = 1.1$ мкс) была значительно меньше интервала времени t между ними (от 10 мкс и более), поэтому в потоке периодически происходило практически «мгновенное» образование плазмы протяженностью L , которая к моменту следующего импульса смещалась вниз по течению на расстояние ut или u/f . Условие слияния плазменных областей за время t при их слабом осевом расширении можно выразить приближенным равенством $u/f \approx L$. При известных параметрах u и L этим соотношением определяется пороговая частота $f \approx u/L$ перехода от нестационарного к квазистационарному характеру изменения параметров в тепловом следе за плазменным энергоисточником. Важно отметить, что этот результат не зависит от механизмов формирования оптического разряда, поскольку выполняется условие короткой длительности импульса излучения $\tau/t \ll 1$ при значительной протяженности плазмы. Полученный вывод подтверждается результатами экспериментов.

При изучении влияния электрического поля на плазму, созданную оптическим разрядом, применялись схемы расположения электродов,

представленные на рис. 1 (вид А). На рис. 1,б приведена электрическая схема для создания поля, направленного вдоль лазерного луча. Выступающие края электродов располагались над лазерным лучом. На рис. 1,в показана схема для случая, когда электрическое поле направлено по потоку. Форма и полярность электродов в ходе опытов менялись. Напряжение на электродах варьировалось от 6 до 30 кВ.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Предварительно было исследовано влияние электрического поля на плазму ОНР, находящуюся в воздушном потоке. Установлено, что слабое электрическое поле (до 1 кВ/см) практически не влияет на размеры плазменного образования. При этом снижается вероятность оптического пробоя при наличии поля вне зависимости от конфигурации силовых линий и полярности прикладываемого напряжения. При напряженности поля свыше 3 кВ/см наличие плазмы ОНР приводило к возникновению электрического пробоя. Форма и предельные характеристики электрического пробоя зависели от конфигурации электродов, полярности прикладываемого напряжения и скорости воздушного потока. В случае направления поля по потоку наблюдался пробой от среза сопла (положительно заряженный электрод) до места фокусировки лазерного луча. Выше по потоку от плазмы оптического пробоя стримеры отсутствовали.

Рассмотрено два случая инициирования воспламенения водородовоздушной смеси в сверхзвуковом потоке: 1) оптическим разрядом, 2) оптическим разрядом при наличии электрического поля. Присутствие электрического поля необходимо для увеличения энергоподвода в поток. Тогда плазма, созданная совместным воздействием сфокусированного лазерного излучения и электрического разряда, может инициировать горение и стабилизировать пламя гомогенной водородовоздушной смеси в высокоскоростном потоке.

Горение водорода в воздухе без электрического поля в сверхзвуковом потоке удалось получить только в виде периодических зон. Результаты спектросональной регистрации для числа Маха на срезе сопла $M = 1.4$ при горении водорода в воздухе показаны на рис. 2,а. Виден прерывистый режим горения. Высота зоны горения превышала $h = 100$ мм, а поперечные размеры сравнимы с областью плазменно-

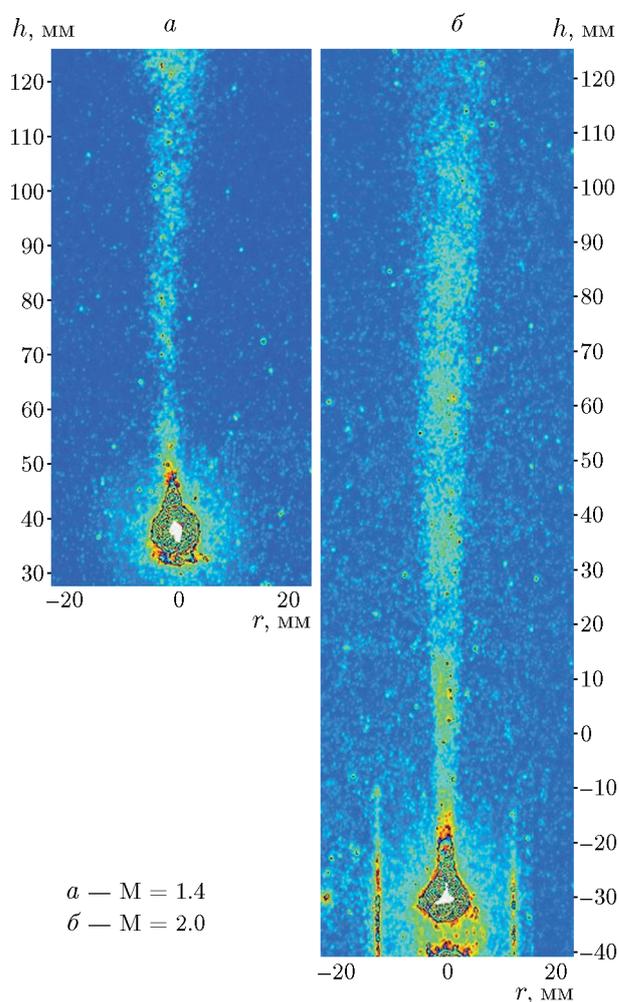


Рис. 2. Спектросональная регистрация радикалов OH^* в зоне горения водорода без электрического поля.

го образования. Результаты эксперимента при $M = 2.0$ дали подобный результат (рис. 2,б). Однако высота зоны горения больше и превышает 150 мм. Области с высокой интенсивностью излучения совпадают с положением скачков ударно-волновой структуры струи.

Полученные данные свидетельствуют о локализации горения непосредственно в тепловом следе за оптическим пробоем, без существенного распространения поперек потока.

Изучалось комбинированное энергетическое воздействие оптического и электрического разрядов на горение топливовоздушной смеси в сверхзвуковой струе.

В экспериментах использовались различные электроды: плоские пластины; кольцевые электроды, расположенные как по потоку, так

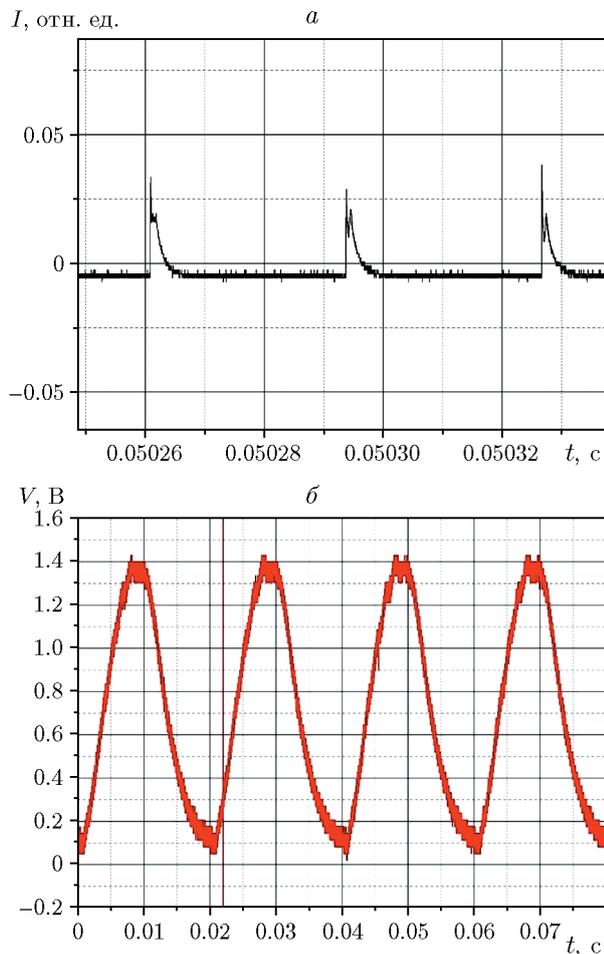


Рис. 3. Форма электрического сигнала на электродах

и поперек потока; электроды в виде затупленных конусов. Применение последних позволило получить квазистационарный режим электрических разрядов при регулярном воспроизведении пробоя струи. То есть на электродах в виде двух затупленных конусов тепло подводилось внутрь потока. Кольцевые электроды давали электрические разряды, которые проходили по границе струи, и большая часть подведенной энергии попадала на периферию. Плоские электроды не давали квазистационарную картину электрических разрядов.

Было изучено влияние формы электрического сигнала на формирование ОПР и электрических разрядов. Электрическая схема имела несколько модификаций с различной формой электрических сигналов на электродах. На рис. 3 приведено два вида импульсно-периодических электрических сигналов. Устойчивые электрические разряды бы-

ли зафиксированы на вершинах синусоиды (см. рис. 3,а, 4,а), где напряжение было максимальным. В области минимального напряжения электрические разряды отсутствовали (см. рис. 3,б, 4,б). Форма электрического сигнала на электродах очень сильно влияла на процесс воспламенения и горения в сверхзвуковом потоке. Наиболее стабильное инициирование горения было с синусоидальными сигналами.

При инициировании ОПР и электрического разряда получено значительное уменьшение напряжения, при котором возникают стримеры. Так, без ОПР пробойное напряжение равнялось 24 кВ, а при его наличии напряжение уменьшилось до 17 кВ. При этом ток на электродах менялся от 1 до 0.6 мА.

Рассмотрим влияние комбинированного разряда на инициирование и горение сверхзвуковой водородовоздушной струи, истекающей в затопленное пространство. Результаты спектральной регистрации представлены на рис. 5. Число Маха на выходе из сопла равно $M = 1.4$. Давление в форкамере 0.55 МПа, температура 290 К. Сравним полученные результаты по горению, вызванному только оптическим разрядом (см. рис. 2,а) и комбинированным разрядом (см. рис. 5,а). Наблюдается различие в формах областей реакций. Слабая периодическая структура зон локального горения меняется на устойчивое пламя, занимающее всю площадь поперечного сечения сверхзвуковой струи. Высота области горения становится более 120 мм.

Применение комбинированного разряда дало эффект, сравнимый по результатам со случаем, когда применялся механический стабилизатор. В [22] экспериментально показано, что механический стабилизатор (конус), помещенный в сверхзвуковой поток с числом Маха $M = 2$, при воздействии оптического разряда, расположенного в его следе, позволяет зажечь высокоскоростную водородовоздушную струю по всей площади поперечного сечения. Об этом свидетельствуют результаты спектральной съемки (рис. 5,б).

Использование в сверхзвуковом потоке механического стабилизатора и поддерживающего его пилон приводят к значительным потерям полного давления. Потери растут с увеличением скорости потока. Применение для тех же целей комбинированного разряда существенно снизит потери полного давления.

Таким образом, получено стабильное горе-

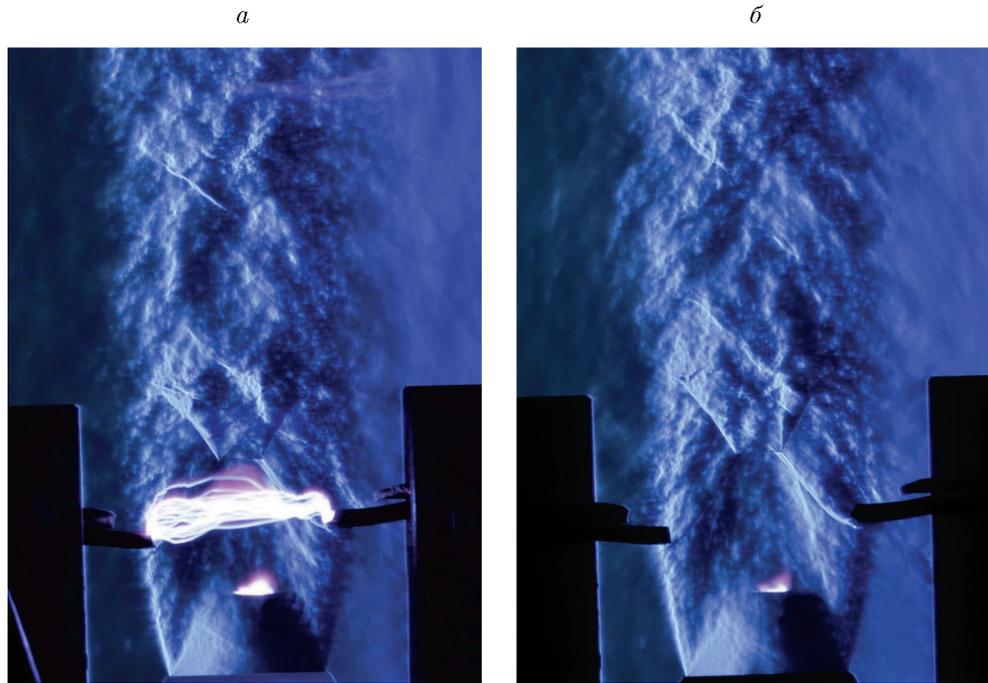


Рис. 4. Теневая регистрация течения в сверхзвуковой струе:

a — при наличии электрического разряда (максимум синусоиды, выдержка 0.004 с), *б* — в отсутствие электрического разряда (минимум синусоиды)

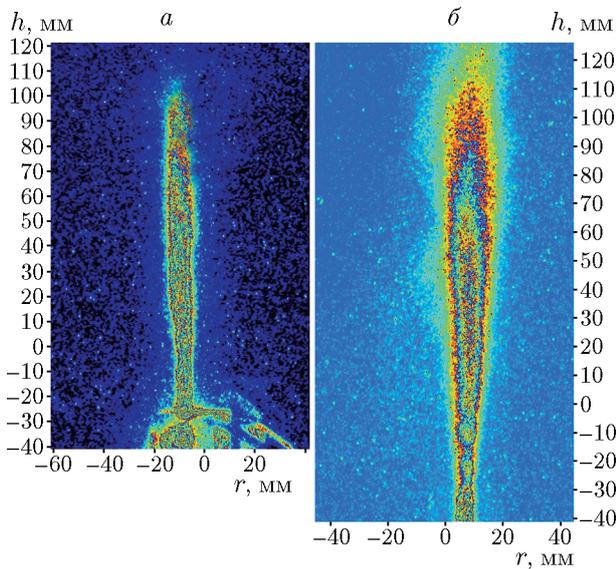


Рис. 5. Спектрозональная регистрация радикалов OH^* в зоне горения водорода:

a — стабилизация лазерным пробоем и электрическим полем ($M = 1.4$), *б* — стабилизация на механическом стабилизаторе ($M = 2.0$)

ние в сверхзвуковом потоке, при использовании комбинированного способа подвода энергии в сверхзвуковой поток водородовоздушной смеси.

Иницирование горения осуществлялось поперечным импульсно-периодическим оптическим разрядом совместно с поперечным импульсно-периодическим электрическим полем. В поперечном сечении область горения занимала всю площадь сверхзвуковой струи и превышала площадь зоны оптического разряда.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведено экспериментальное исследование воздействия сфокусированного импульсно-периодического излучения CO_2 -лазера на иницирование и развитие процесса горения в до- и сверхзвуковом потоке гомогенных водородовоздушных смесей. Иницирование горения осуществлялось совместным воздействием плазмой оптического разряда и электрическим разрядом в центре потока.

Показано, что применение комбинированного энергетического воздействия (оптический + электрические разряды) на высокоскоростную водородовоздушную струю позволяет зажечь её по всей площади поперечного сечения. Такой подход не требует наличия механического стабилизатора в сверхзвуковом потоке для организации горения, что может существенно уменьшить потери полного давления.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Phuoc T. X.** Laser-induced spark ignition fundamental and applications (Review) // *Opt. Laser Eng.* — 2006. — V. 44, N 5. — P. 351–397. — DOI: 10.1016/j.optlaseng.2005.03.008.
2. **Ronney P. D.** Laser versus conventional ignition of flames // *Opt. Eng.* — 1994. — V. 33, N 2. — P. 510–521. — DOI: 10.1117/12.152237.
3. **O'Briant S. A., Gupta S. B., Vasu S. S.** Review: laser ignition for aerospace propulsion // *Propul. Power Res.* — 2016. — V. 5, N 1. — P. 1–21. — DOI: 10.1016/j.jprr.2016.01.004.
4. **Morsy M. H.** Review and recent developments of laser ignition for internal combustion engines applications // *Renew. Sustain. Energy Rev.* — 2012. — V. 16, N 7. — P. 4849–4875. — DOI: 10.1016/j.rser.2012.04.038.
5. **Starikovskiy A., Aleksandrov N.** Plasma-assisted ignition and combustion // *Prog. Energy Combust. Sci.* — 2013. — V. 39, N 1. — P. 61–110. — DOI: 10.1016/j.pecs.2012.05.003.
6. **Do H., Cappelli M. A., Mungal M. G.** Plasma assisted cavity flame ignition in supersonic flows // *Combust. Flame.* — 2010. — V. 157. — P. 1783–1794. — DOI: 10.1016/j.combustflame.2010.03.009.
7. **Leonov S., Yarantsev D., Carter C.** Experiments on electrically controlled flameholding on a plane wall in a supersonic airflow // *Propul. Power.* — 2009. — V. 25, N 2. — P. 289–294. — DOI: 10.2514/1.38002.
8. **Brieschenk S., O'Byrne S., Kleine H.** Ignition characteristics of laser-ionized fuel injected into a hypersonic crossflow // *Combust. Flame.* — 2014. — V. 161, N 4. — P. 1015–1025. — DOI: 10.1016/j.combustflame.2013.09.024.
9. **Зудов В. Н., Грачев Г. Н., Крайнев В. Л., Смирнов А. Л., Третьяков П. К., Тупикин А. В.** Иницирование горения оптическим разрядом в сверхзвуковой метановоздушной струе // *Физика горения и взрыва.* — 2013. — Т. 49, № 2. — С. 144–147.
10. **Третьяков П. К., Тупикин А. В., Зудов В. Н.** Воздействие лазерным излучением и электрическим полем на горение углеводородовоздушных смесей // *Физика горения и взрыва.* — 2009. — Т. 45, № 4. — С. 77–85.
11. **Коресек Н., Maier H., Reider G., Winter F., Wintner E.** Laser ignition of methane-air mixtures at high pressures // *Exp. Therm. Fluid Sci.* — 2003. — V. 27, N 4. — P. 499–503. — DOI: 10.1016/S0894-1777(02)00253-4.
12. **Brieschenk S., Kleine H., O'Byrne S.** Laser ignition of hypersonic air-hydrogen flow // *Shock Waves.* — 2013. — V. 23, N 5. — P. 439–452. — DOI: 10.1007/s00193-013-0447-6.
13. **Horisawa H., Tsuchiya S., Negishi J., Okawa Y., Kimura I.** Laser ignition and flameholding characteristics in supersonic airstreams // *Proc. Soc. of Photo-Opt. Instrum. Eng.* — 2004. — V. 5448. — DOI: 10.1117/12.548344.
14. **Phuoc T. X., White F. P.** Laser-induced spark ignition of CH₄/air mixtures // *Combust. Flame.* — 1999. — V. 119, N 3. — P. 203–216. — DOI: 10.1016/S0010-2180(99)00051-6.
15. **Ma J. X., Alexander D. R., Poulain D. E.** Laser spark ignition and combustion characteristics of methane-air mixtures // *Combust. Flame.* — 1998. — V. 112, N 4. — P. 492–506. — DOI: 10.1016/S0010-2180(97)00138-7.
16. **Phuoc T. X.** Laser spark ignition: experimental determination of laser-induced breakdown thresholds of combustion gases // *Opt. Commun.* — 2000. — V. 175, N 4-6. — P. 419–423. — DOI: 10.1016/S0030-4018(00)00488-0.
17. **Beduneau J.-L., Ikeda Y.** Application of laser ignition on laminar flame front investigation // *Exp. Fluids.* — 2004. — V. 36, N 1. — P. 108–113. — DOI: 10.1007/s00348-003-0670-5.
18. **Phuoc T. X., White C. M.** Experimental studies of the absorption and emissions from laser-induced spark in combustible gases // *Opt. Commun.* — 2000. — V. 181, N 4-6. — P. 353–359. — DOI: 10.1016/S0030-4018(00)00770-7.
19. **Третьяков П. К., Грачев Г. Н., Иванченко А. И., Крайнев В. Л., Пономаренко А. Г., Тищенко В. Н.** Стабилизация оптического разряда в сверхзвуковом потоке аргона // *Докл. РАН.* — 1994. — Т. 336, № 4. — С. 466–467.
20. **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.
21. **Tupikin A. V., Zudov V. N., Grachev G. N., Smirnov A. L.** Combined optical and electrical discharge in air flow // *AIP Conf. Proc.* — 2020. — V. 2288. — 030051. — DOI: 10.1063/5.0030237.
22. **Зудов В. Н., Третьяков П. К.** Иницирование оптическим разрядом гомогенного горения в высокоскоростной струе топливовоздушной смеси // *Физика горения и взрыва.* — 2017. — Т. 53, № 3. — С. 18–27. — DOI: 10.15372/FGV20170302.

Поступила в редакцию 15.02.2022.

После доработки 16.03.2022.

Принята к публикации 30.03.2022.