

УДК 536.46;533.98

ИНИЦИИРОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИМ РАЗРЯДОМ ГОМОГЕННОГО ГОРЕНИЯ В ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ СТРУЕ ТОПЛИВОВОЗДУШНОЙ СМЕСИ

В. Н. Зудов, П. К. Третьяков

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

Проведено экспериментальное исследование воздействия сфокусированного импульсно-периодического излучения CO₂-лазера на инициирование и развитие процесса распространения горения в до- и сверхзвуковом потоке гомогенных топливовоздушных смесей (H₂ + воздух, CH₄ + воздух). Излучение CO₂-лазера распространялось поперек потока и фокусировалось линзой на оси струи. Для регистрации структуры течения применялась теневая схема со щелью и плоским ножом, расположенным вдоль потока. Изображение фиксировалась скоростной камерой с временем экспозиции 1.5 мкс и частотой кадров 1000 с⁻¹. Изучена структура зоны горения на примере собственного свечения пламени на длинах волн радикалов OH и CH. В проведенных экспериментах методами эмиссионной спектроскопии исследовано распределение интенсивности излучения компонентов в области оптического разряда.

Ключевые слова: оптический разряд, гомогенное горение, сверхзвуковая нерасчетная струя, спектральная регистрация, теневая регистрация, спектроскопия.

DOI 10.15372/FGV20170302

ВВЕДЕНИЕ

Воспламенение смеси и стабилизация горения в высокоскоростных воздушных потоках при давлении $p = 1 \div 10$ бар является серьезной проблемой при создании камеры сгорания для высокоскоростных летательных аппаратов [1–4]. В ходе решения этих проблем сформировался ряд направлений фундаментального характера по исследованию внешнего энергетического воздействия на до- и сверхзвуковое течение топливовоздушных смесей [5]. Для воспламенения в потоке горючих смесей используются различного типа электрические разряды (глюющий, дуговой, микроволновый, барьерный и т. п.), оптический разряд. Применение оптического разряда для воспламенения и стабилизации горения в двигательных системах увеличивает генерацию активных радикалов, ионов и электронов, которые могут существенно повысить скорость химических реакций, участвующих в горении [4–8]. Такой подход был проверен для широкого диапазона разнообразных приложений, среди которых можно отметить следующие: горелочные устройства в энергетических установках, двигатели внутреннего сгорания [9], воспламенение жидких и твердых топлив, воспламенение за стаби-

лизаторами при сверхзвуковых скоростях потока [10, 11].

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) показана в [8] на примере стабилизации горения водорода. Из обзора [1] следует, что наименее изученной остается область сверхзвуковых скоростей при давлении выше 1 бар. Эти диапазоны скорости и давления представляют интерес для камер сгорания двигателей высокоскоростных летательных аппаратов [3, 6, 12–15]. Применение плазменных источников может обеспечить объемное и быстрое воспламенение топливовоздушной смеси за счет эффективной наработки радикалов.

Современные достижения в исследовании и создании плазменных технологий, используемых для инициирования и повышения эффективности горения в двигателях и силовых установках, привели к формированию новой области науки, известной как инициирование горения плазмой. Предлагаемая работа направлена на выявление условий воспламенения и стабилизации горения углеводородной смеси в сверх-

звуковым потоке при инициировании процесса импульсно-периодическим лазерным излучением [7, 8].

Отметим некоторые преимущества лазерного воспламенения: свободный выбор положения точки воспламенения в пространстве и времени, отсутствие эрозии электродов и металлических поверхностей, возможность воспламенения очень бедных газовых смесей, существенное сокращение вредных выбросов NO_x , более точный выбор времени и длительности воспламенения, возможность работать при большом давлении в камере сгорания, более простое регулирование энергии воспламенения, легкая реализация многоточечного воспламенения [1–4]. Использование плазмы для инициирования и стабилизации горения потенциально может устранить потребность в механических стабилизаторах пламени. За традиционными механическими стабилизаторами пламени, как правило, устанавливаются устойчивые дозвуковые зоны горения, которые стабилизируют горение в спутном сверхзвуковом потоке. С увеличением скорости потока условия стабилизации ухудшаются [6, 13–15]. Введение инжектора или плохо обтекаемого тела в сверхзвуковую камеру сгорания приводит к недопустимому увеличению потерь полного давления.

Стабильная плазма в газовом потоке может быть сформирована, когда локальная плотность сфокусированного лазерного излучения становится порядка 10^{10} Вт/см² [1, 2]. Имеется четыре механизма взаимодействия лазерного излучения с горючей смесью, чтобы вызвать ее воспламенение: тепловое инициирование, фотохимическое воспламенение, резонансный пробой и нерезонансный пробой [1–4]. Относительное значение каждого механизма зависит от длины волны лазерного луча. Нерезонансный пробой — наиболее часто используемый режим воспламенения, если требуется зажечь весь поток [1, 16]. В нашей работе для создания оптического разряда использовался нерезонансный пробой. Фокусировка импульсно-периодического излучения лазера в достаточно малом объеме газа создает высокую интенсивность светового потока и высокое электрическое поле в области фокуса, что впоследствии может привести к образованию ограниченной по пространству плазмы.

В литературе представлено ограниченное число работ по лазерному воспламенению метановоздушных смесей, так же как и водород-

воздушных смесей, основанному на механизме нерезонансного пробоя [6, 13–15, 17–19]. В работе [20] для воспламенения использовался наносекундный лазер с длиной волны 1064, 248, 193 нм. Проведенное сравнение с условным электрическим воспламенением искры показало, что лазерное инициирование может значительно ускорить воспламенение и этот процесс не зависит от длины волны.

Длительное квазистационарное воздействие на структуру сверхзвукового течения можно получить при использовании CO_2 -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 [12, 21]. Такая задача решена в совместной работе ИТПМ и ИЛФ СО РАН [21] путем использования импульсно-периодического излучения CO_2 -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 в расчетном режиме с числом Маха $M = 2$ при статическом давлении 0.6 атм. Вследствие высокой интенсивности импульсов излучения происходил оптический пробой среды, и в потоке формировалась пульсирующая плазма с частотой следования лазерных импульсов. Длительность лазерных импульсов ($\tau = 1.1$ мкс) была значительно меньше интервала времени t между ними (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 [12, 21].

Цель предлагаемого исследования — найти условия, необходимые для того, чтобы энергоподвод, созданный сфокусированным лазерным излучением (лазерной плазмой), мог инициировать воспламенение гомогенной смеси в высокоскоростном потоке. Предполагается, что параметры гомогенной смеси далеки от режима самовоспламенения.

СХЕМА ЭКСПЕРИМЕНТА

Для образования лазерной плазмы оптического пульсирующего разряда применялся электроразрядный CO_2 -лазер ЛОК-ЗСГУ [21], который в опытах 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 на заданном расстоянии от среза сопла. Расстояние от среза сопла в ходе экспериментов варьировалось. Топливовоздушная смесь подавалась в форкамеру, проходя через систему измерения расхода. Внутренний диаметр форкамеры 80 мм, длина 95 мм. Для формирования сверхзвукового потока газа использовалось коническое сопло с угловой точкой. Диаметры критического и выходного сечений равны 15.5 и 20 мм соответственно. Расстояние между указанными сечениями 25 мм. Максимальное давление в форкамере 8 атм, температура 290 К. Число Маха на выходе из сопла $M = 2.0$. При мощности импульсно-периодического излучения лазера, превышающей пороговое значение в области фокуса, в потоке зажигался оптический пульсирующий разряд. Гомогенная метановоздушная (или водородовоздушная) смесь истекала в затопленное пространство (степень нерасчетности $n = 0.9$). Были рассмотрены режимы с коэффициентом избытка воздуха в диапазоне $\alpha = 0.7 \div 1.2$. Изображение фиксировалась скоростной камерой с временем экспозиции 1.5 мкс и частотой кадров 1000 с^{-1} . Яркое собственное свечение возникающей плазмы и высокая частота следования импульсов накладывают определенные требования на систему визуализации течения. Для удобства транспортировки излучения применялся световод. Для регистрации структуры течения использовалась теневая схема со щелью и плоским ножом, расположенным вдоль потока. В остальном схема регистрации типич-

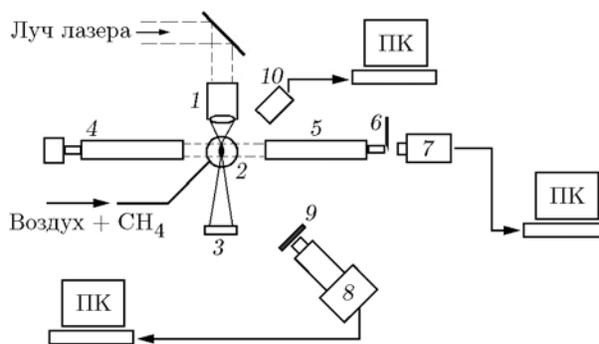


Рис. 1. Схема эксперимента:

1 — линзы; 2 — горелка (сверхзвуковое сопло); 3 — поглотитель; 4, 5 — шлирен-система; 6 — нож; 7 — высокоскоростная камера; 8 — камера спектральной съемки; 9 — интерференционный фильтр; 10 — CCD-камера

на при реализации шлирен-метода визуализации течения.

Спектральная съемка проводилась на длине волны излучения радикалов OH , CH , C_2 . 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.

На рис. 1 представлена схема эксперимента. Использовались два режима работы лазера: первый — импульсно-периодический, второй — пакетный. Во втором режиме задана частота в пакете $f_1 = 60$ кГц, частота следования пакетов $f_2 = 5$ кГц (в пакете шесть импульсов). Результаты, представленные на рис. 2, соответствуют пакетному режиму работы лазера. В воздушном потоке каждый лазерный импульс приводил к образованию плазмы (рис. 2,а), а добавка метана — к кратному увеличению порога оптического пробоя метановоздушной среды. В метановоздушной струе реализовывалось всего два пробоя из шести импульсов при тех же параметрах частоты следования пакетов (рис. 2,б).

РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕНЕВОЙ РЕГИСТРАЦИИ

В оптической схеме визуализации структуры течения применялся искровой источник подсветки (экспозиция 10^{-6} с) с регистрацией цифровым фотоаппаратом. Это позволило резко повысить качество теневых снимков.

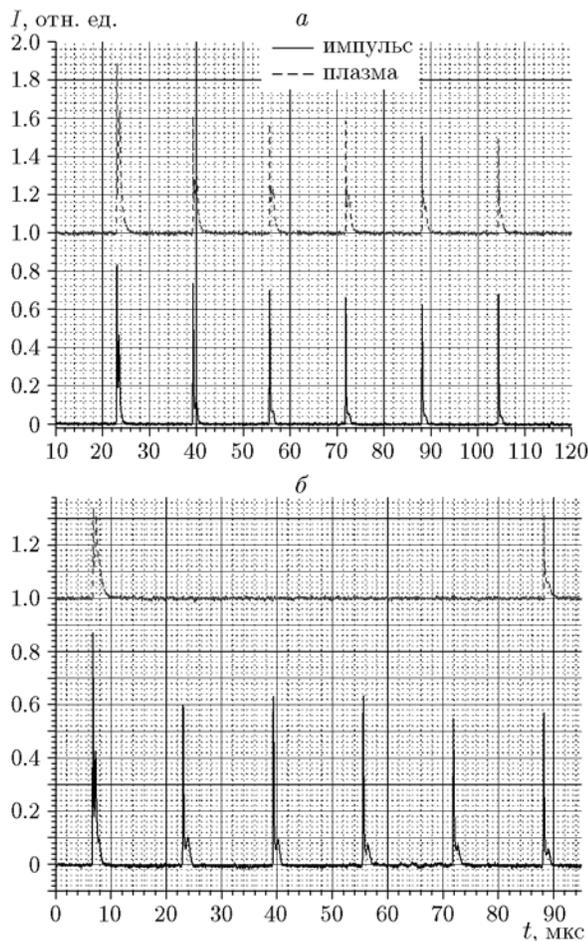


Рис. 2. Излучение падающего лазерного импульса и плазмы оптического разряда:

а — в воздухе, *б* — в смеси метан + воздух

С более высоким разрешением была выявлена внутренняя структура сверхзвуковой затопленной струи, состоящая из скачков уплотнения, плазмоида и тепловых неоднородностей в следе за ним. В неподвижном пространстве за границей струи наблюдаются периодические звуковые возмущения, частота которых соответствует частоте следования лазерных импульсов (рис. 3, б).

На рис. 4 приведены шлирен-фотографии оптического разряда в дозвуковом и сверхзвуковом потоках. Эволюция разряда в сверхзвуковом потоке представлена верхним рядом снимков, на которых показано возникновение и затухание ограниченной области плазмы (плазмоид). На этих фотографиях наблюдается также предыдущий плазмоид, который уже значительно охладился и превратился в тепловую неоднородность с существенно по-

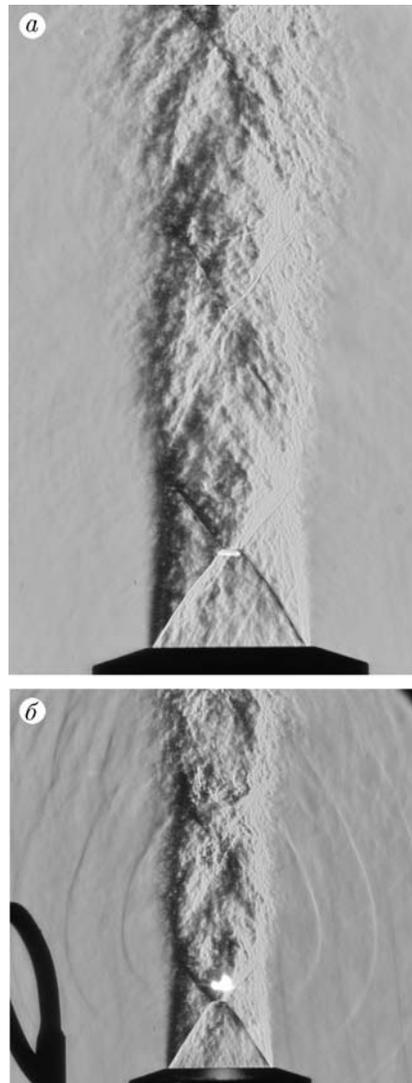


Рис. 3. Теневая регистрация течения в сверхзвуковой струе:

а — оптический разряд в сверхзвуковом потоке, *б* — в дозвуковом потоке

нижней температурой. Далее тепловое пятно сносится вниз по потоку. Расстояние между этим пятном и возникшим плазмоидом видно на верхних снимках рис. 4. Детали структуры течения хорошо просматриваются на теневых фотографиях. Из анализа следует, что в потоке образуется ограниченная область плазмы, о чем свидетельствует возникновение ударных волн почти эллиптической формы. Размеры плазменной области составляют $1.0 \div 3.0$ мм (при диаметре пятна фокусировки 0.2 мм); за ней развивается периодический тепловой след. Структура следа зависит от частоты импульсов. Проведенные оценки показывают, что при

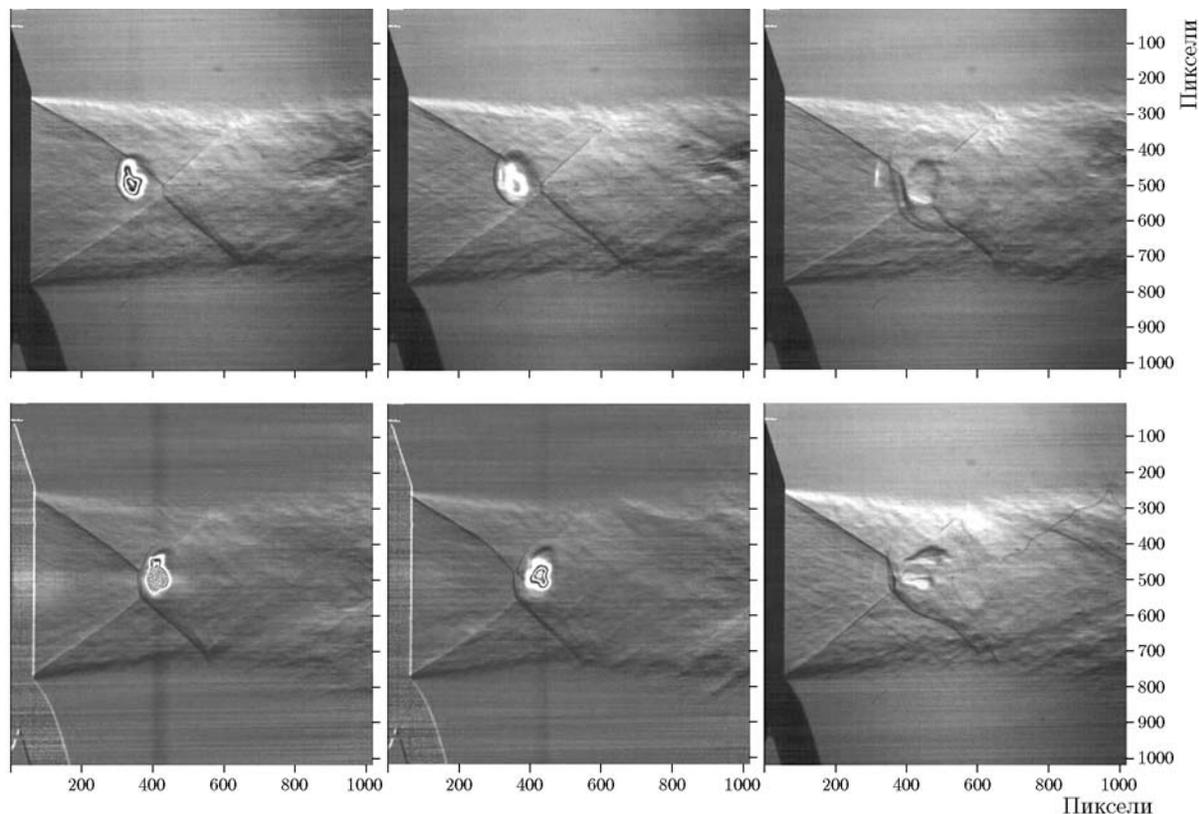


Рис. 4. Шлирен-фотографии течения в сверхзвуковой струе:

верхние снимки — оптический разряд в сверхзвуковом потоке, нижние — в дозвуковом потоке

частоте $f = 120$ кГц след становится квазине-прерывным.

РЕЗУЛЬТАТЫ СПЕКТРОЗОНАЛЬНОЙ РЕГИСТРАЦИИ

Спектрозональная съемка формы зоны горения проводилась на длине радикалов OH и CH. Для этого была задействована Imager intense CCD камера с динамическим диапазоном 12 бит, пространственным разрешением 1376×1040 пиксел, частотой кадров 10 Гц, с PC PCI граббером, минимальной экспозицией 1 мкс. Во избежание засветки матрицы скоростной камеры от оптического разряда область регистрации находилась ниже по потоку от места пробоя. Расход газов измерялся регуляторами расхода Bronkhorst EFlow (с погрешностью не более 1 %). В качестве топлива использовались метан и водород.

Горение метана

В предварительно перемешанном сверхзвуковом потоке топлива с окислителем го-

рение поддерживается за счет образования в плазме оптического разряда активных радикалов (O, H, OH, CH, C₂ и др.). Для получения данных о структуре зоны горения метановоздушной смеси применялась спектрозональная съемка на длинах волн радикалов OH и CH. Регистрация на длине волны радикала C₂ также использовалась, но сигнал на этой длине был на уровне шума. Зона горения, выявленная в эксперименте, одинаково отображалась на обеих длинах волн (CH и OH), что характерно для горения предварительно перемешанной углеводородно-воздушной смеси (CH₄ + воздух) (рис. 5). Нижняя граница области спектрозональной регистрации находилась на расстоянии $15 \div 17$ мм вниз по потоку от места фокусировки лазерного луча. Внешняя граница горения вначале расширяется до 12 мм, а затем сужается. Локальный максимум свечения соответствует вершине пламени. Расстояние от нижней границы регистрации до вершины составляло приблизительно $35 \div 40$ мм. В опытах наблюдалось регулярное воспламенение смеси при коэффициенте избытка воздуха

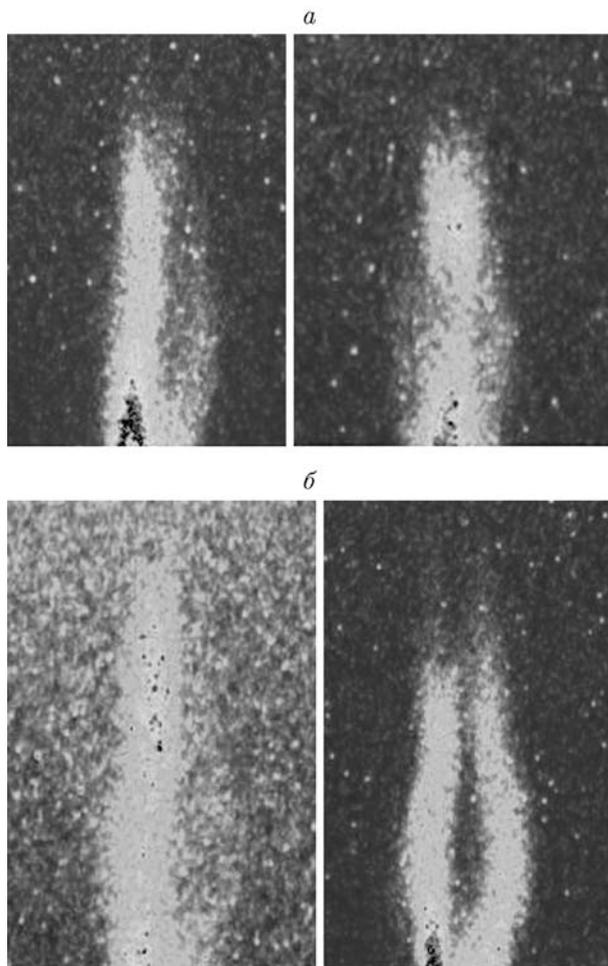


Рис. 5. Спектрозональная регистрация радикалов ОН (*a*) и радикалов СН (*б*) в зоне горения

0.8 ÷ 1.2. Полученные данные свидетельствуют о локализации горения непосредственно в тепловом следе за оптическим пробоем, без распространения его на всю струю.

Горение водорода

В работе проведены эксперименты по воспламенению предварительно перемешанной водородовоздушной смеси. Число Маха на срезе сопла $M = 2$. Рассматривались два случая: воспламенение и стабилизация смеси оптическим разрядом (т. е. оптическим стабилизатором), воспламенение и стабилизация смеси оптическим разрядом при наличии механического стабилизатора. Механический стабилизатор состоял из конуса с углом полураствора 20° и диаметром 6 мм. Он помещался по

оси струи. Оптический разряд формировался на различных расстояниях в следе от конуса. Велась теневая, спектрозональная и прямая съемка газодинамических процессов. Получено стабильное горение в сверхзвуковом потоке с помещенным в него коническим стабилизатором для водородовоздушной смеси (рис. 6, *a*). Иницирование горения осуществлялось поперечным импульсно-периодическим оптическим разрядом в донной области стабилизатора. В поперечном сечении область горения занимала всю площадь струи и значительно превышала донную площадь конуса. Высота области горения превышала 200 мм.

Горение водорода в воздухе без механического стабилизатора удалось получить только в виде периодических зон горения. Результаты спектрозональной регистрации радикалов ОН при горении водорода в воздухе показаны на рис. 6, *б*. Виден прерывистый режим горения. Наиболее значительные зоны горения совпадают с ударно-волновой структурой скачков в сверхзвуковой струе.

РЕЗУЛЬТАТЫ СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКОЙ РЕГИСТРАЦИИ

Для того чтобы измерить излучение от плазмы и пламени и лучше понять процессы горения, инициированные плазменными образованиями, в работе использовался компактный высокочувствительный спектрометр SC125. Спектроскопические исследования иницирования воспламенения топливовоздушной смеси были выполнены на заданном расстоянии от среза сверхзвукового сопла, в области плазмоида. Спектр регистрировался в диапазоне длин волн $\lambda = 210 \div 770$ нм при спектральном разрешении (среднее значение) 1 нм. Спектры записывались на персональный компьютер.

На рис. 7 приведены результаты спектрометрических измерений активных частиц — атомов и радикалов — в области формирования оптического разряда. Экстремумы сигналов во времени полностью совпадают друг с другом и отличаются только интенсивностью сигнала. На рис. 7 представлены спектры с максимальной интенсивностью.

Приведенная на рис. 7 спектрограмма использовалась для идентификации возбужденных компонентов в водородовоздушной плазме. Давление в форкамере равнялось 9 атм, а давление окружающей среды — 1 атм. Главные

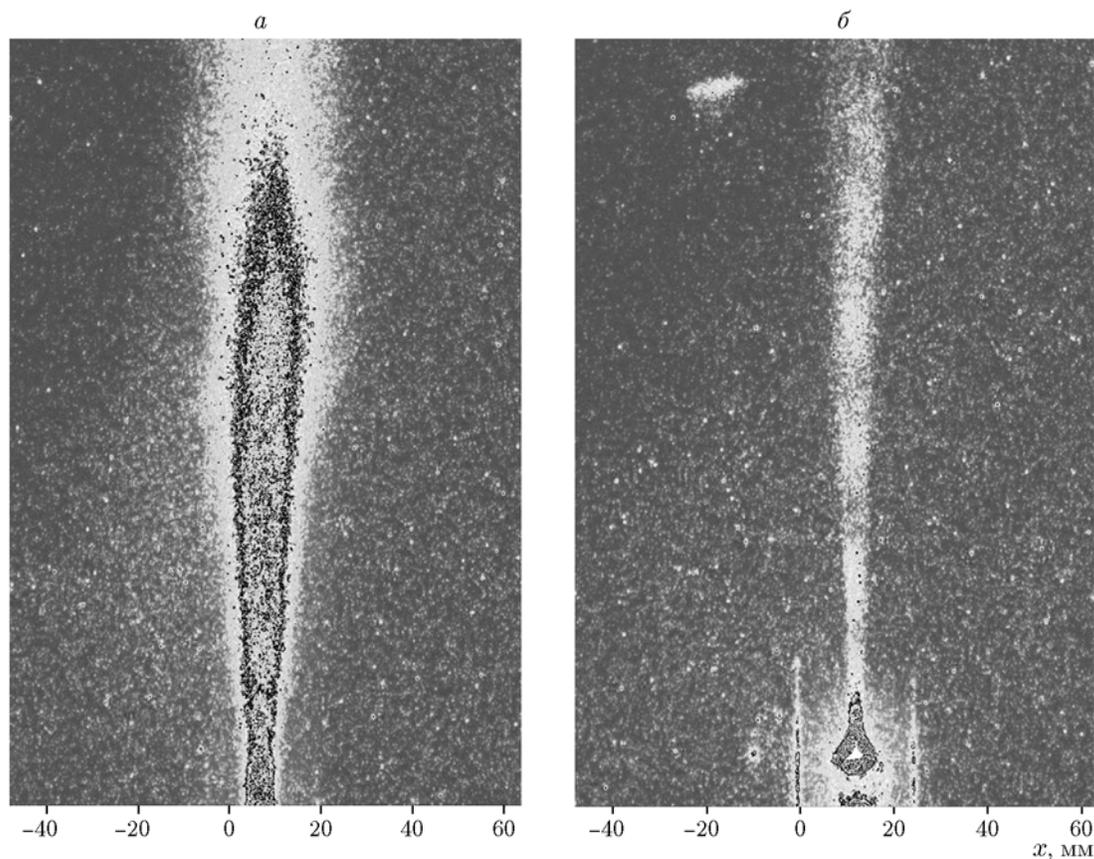


Рис. 6. Спектрозональная регистрация радикалов OH в зоне горения водорода со стабилизатором (*a*) и без стабилизатора (*б*)

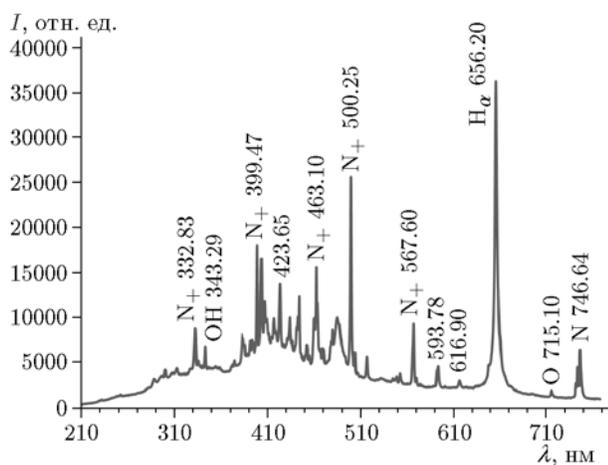


Рис. 7. Спектрометрическая регистрация оптического разряда при горении водорода в воздухе

пики маркированы соответственно компонентам, производящим спектральные пики. Преимущественно анализировались распределения

интенсивности излучения радикалов OH , молекулярного азота и атомарных водорода, кислорода, азота.

Идентификация водорода обычно облегчается присутствием сильных водородных линий Balmer, которые были зафиксированы в эксперименте. Линии ряда Balmer определены для атомарного водорода в H_α (656.3 нм), H_β (486.2 нм) и H_γ (434.1 нм). Линия H_δ (410.17 нм) также присутствует, но более слабо, чем первые три, и, возможно, она замаскирована эмиссией возбужденных молекул CN либо C_2 в районе 410 нм. Линии Balmer для атомарного водорода присутствуют почти во всех углеводородных пламенах, и они чрезвычайно яркие. Из них линия в H_α 656.3 нм является самой сильной. Необходимо отметить, что присутствие OH , CH , CN , C_2 не указывает непосредственно на реакции горения. Эти молекулы могут быть произведены в результате оптического разряда. Гидроксильный радикал OH также наблюдался в данном эксперимен-

те на длине волны 343.29 нм, но его интенсивность была слабой. Обычно он дает систему полос, из которых самая сильная 306.4 нм.

Из приведенных на рис. 7 данных видно, что в плазмоиде присутствует сильное излучение N_2 (386 нм, 399.8 нм, вторая положительная система, $C^3P_u - B^3P_g$). В интервале $\lambda = 322 \div 567$ нм наблюдается излучение иона азота N_+ (332.5, 500.25, 567.6 нм). Особо следует отметить специфику свечения атомов N и O. В плазмоиде можно выделить линию атома азота N (746.89 нм). Свечение атома O наблюдалось при 715.6 нм. Но известно [18, 19, 22], что самая сильная линия атома кислорода O соответствует 777.3 нм.

Итак, в данной работе было измерено излучение оптического пробоя в сверхзвуковом потоке и определены основные типы радикалов, присутствующих в водородовоздушной плазме. Спектры излучений идентифицированных компонентов плазмы состояли из N_2 , N, N_+ , H_α , H_β , O, C_2 . Обращает на себя внимание сильная интенсивность H, что не может не сказаться на развитии инициирования и протекании процесса горения. Это требует проведения дополнительного исследования.

Излучение от лазерной искры, созданной в воздухе, состояло главным образом из линий от N_2 , N_+ , которые располагались в диапазоне 330 \div 710 нм. Для эмиссионных линий иона азота N_+ сильные испускания наблюдались в пределах 332.53, 404.48, 463.1, 500.25, 546.15, 567.6 нм. Для молекулярного азота N_2 наблюдалось излучение линии 435.8 нм. В рассмотренном диапазоне $\lambda = 210 \div 710$ нм интенсивных линий O не обнаружено. Как показано в [22–24], наиболее интенсивные линии O соответствовали значениям 777.19, 777.3, 777.6 нм.

Таким образом, в результате проведенного экспериментального исследования выявлены основные компоненты водородовоздушной плазмы, находящейся в сверхзвуковой струе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

— Разработана и апробирована методика оптических измерений для регистрации структуры течения при взаимодействии сверхзвукового потока с импульсно-периодическим тепловым источником.

— Показано, что при поперечном вводе лазерного излучения в поток образуется периодическая структура теплового следа, с формированием головного скачка уплотнения от зоны

энерговыведения. При малых частотах следования импульсов лазерного излучения взаимодействие теплового пятна с потоком происходит в импульсном режиме.

— Экспериментально показана возможность ограниченного воспламенения оптическим разрядом метановоздушной и водородовоздушной смеси при сверхзвуковом истечении струи в затопленное пространство. Результаты спектроскопической съемки свидетельствуют о протекании реакций горения в следе за областью оптического разряда.

— Показано, что применение механического стабилизатора (конус) и оптического стабилизатора позволяет зажечь высокоскоростную водородовоздушную струю по всей площади поперечного сечения. Следует отметить, что для устойчивой стабилизации пламени необходимо создание локальной зоны рециркуляции с целью увеличения времени контакта продуктов сгорания со свежей смесью.

— Измерено излучение оптического пробоя в сверхзвуковом потоке и определены основные типы радикалов, присутствующих в водородовоздушной плазме. Выявлена сильная интенсивность H, что не может не сказаться на развитии инициирования и протекания процесса горения.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Phuoc T. X.** Laser-induced spark ignition fundamental and applications (Review) // *Opt. Lasers Eng.* — 2006. — V. 44. — P. 351–397.
2. **Ronney P. D.** Laser versus conventional ignition of flames // *Opt. Eng.* — 1994. — V. 33. — P. 510–521.
3. **O'Briant S. A., Gupta S. B., Vasu S. S.** Review: laser ignition for aerospace propulsion // *Propuls. Power Res.* — 2016. — V. 5, iss. 1. — P. 1–21.
4. **Morsy M. H.** Review and recent developments of laser ignition for internal combustion engines applications // *Renew. Sustain. Energy Rev.* — 2012. — V. 16. — P. 4849–4875.
5. **Starikovskiy A., Aleksandrov N.** Plasma-assisted ignition and combustion // *Prog. Energy Combust. Sci.* — 2013. — N 39. — P. 61–110.
6. **Brieschenk S., O'Byrne S., Kleine H.** Ignition characteristics of laser-ionized fuel injected into a hypersonic crossflow // *Combust. Flame.* — 2014. — V. 161. — P. 1015–1025.
7. **Зудов В. Н., Грачев Г. Н., Крайнев В. Л., Смирнов А. Л., Третьяков П. К., Тупикин А. В.** Иницирование горения оптическим разрядом в сверхзвуковой метановоз-

- душной струе // Физика горения и взрыва. — 2013. — Т. 49, № 2. — С. 144–147.
8. **Зудов В. Н., Третьяков П. К., Тупикин А. В.** Воздействие лазерным излучением и электрическим полем на горение углеводородовоздушных смесей // Физика горения и взрыв. — 2009. — Т. 45, № 4. — С. 77–85.
 9. **Коресек Н., Maier H., Reider G., Winter F., Wintner E.** Laser ignition of methane-air mixtures at high pressures // *Experim. Therm. Fluid Sci.* — 2003. — V. 29. — P. 499–503.
 10. **Do H., Cappelli M. A., Mungal M. G.** Plasma assisted cavity flame ignition in supersonic flows // *Combust. Flame.* — 2010. — V. 157. — P. 1783–1794.
 11. **Leonov S., Yarantsev D., Carter C.** Experiments on electrically controlled flame holding on a plane wall in a supersonic airflow // *Propuls. Power.* — 2009. — V. 25. — P. 289–294.
 12. **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.
 13. **Brieschenk S., O'Byrne S., Kleine H.** Ignition characteristics of laser-ionized fuel injected into a hypersonic crossflow // *Combust. Flame.* — 2014. — N 161. — P. 1015–1025.
 14. **Brieschenk S., Kleine H., O'Byrne S.** Laser ignition of hypersonic air-hydrogen flow // *Shock Waves.* — 2013. — N 23. — P. 439–452.
 15. **Horisawa H., Tsuchiya S., Negishi J., Okawa Y., Kimura I.** Laser ignition and flame-holding characteristics in supersonic airstreams // *High-Power Laser Ablation.* — Intern. Soc. for Optics and Photonics, 2004. — P. 586–595.
 16. **Phuoc T. X., White F. P.** Laser-induced spark ignition of CH₄/Air mixtures // *Combust. Flame.* — 1999. — V. 119, N 3. — P. 203–216.
 17. **Phuoc T. X.** Laser spark ignition: experimental determination of laser-induced breakdown thresholds of combustion gases // *Opt. Commun.* — 2000. — V. 175. — P. 419–423.
 18. **Beduneau J.-L., Ikeda Y.** Application of laser ignition on laminar flame front investigation // *Experiments in Fluids.* — 2004. — V. 36. — P. 108–113.
 19. **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. — P. 353–359.
 20. **Ma J. X., Alexander D. R., Poulain D. E.** Laser spark ignition and combustion characteristics of methane — air mixtures // *Combust. Flame.* — 1998. — V. 112. — P. 492–506.
 21. **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. АН.* — 1994. — Т. 336, № 4. — С. 466–467.
 22. **Camacho J. J., Santos M., Díaz L., Juan L. J., Poyato J. M. L.** Spectroscopy study of air plasma induced by IR CO₂ laser pulses // *Appl. Phys. A.* — 2010. — V. 99. — P. 159–175.
 23. **Feroli F., Buckley S. G.** Measurements of hydrocarbons using laser-induced breakdown spectroscopy // *Combust. Flame.* — 2006. — V. 144. — P. 435–447.
 24. **Малов А. Н., Оришнич А. М.** Исследование спектральных характеристик излучения теплового следа оптического пульсирующего разряда в сверхзвуковом потоке воздуха // *Квант. электроники.* — 2015. — Т. 45, № 10. — С. 973–978.

Поступила в редакцию 20/III 2016 г.