

УДК 536.46; 533.98

В.Н. Зудов, П.К. Третьяков, А.В. Тупикин

*Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН,
Россия,
630090, Новосибирск, Институтская ул., 4/1, E-mail: zudov@itam.nsc.ru*

ВОСПЛАМЕНЕНИЕ И СТАБИЛИЗАЦИЯ ОПТИЧЕСКИМ РАЗРЯДОМ ГОМОГЕННОГО ГОРЕНИЯ В ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ СТРУЕ

АННОТАЦИЯ

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

ОПТИЧЕСКИЙ РАЗРЯД, ГОМОГЕННОЕ ГОРЕНИЕ, СВЕРХЗВУКОВАЯ НЕРАСЧЕТНАЯ СТРУЯ, СПЕКТРОЗОНАЛЬНАЯ РЕГИСТРАЦИЯ, ТЕНЕВАЯ РЕГИСТРАЦИЯ, СПЕКТРОСКОПИЯ

ВВЕДЕНИЕ

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 в тракте возникают принципиальные трудности по воспламенению топливо-воздушных смесей при давлениях $p = 1 - 10$ бар [1, 2]. Сформировался ряд направлений фундаментального характера по исследованию внешнего энергетического воздействия на до- и сверхзвуковое течение топливо-воздушных смесей. Развиваются различные способы энергетического воздействия путем создания плазменных объектов в движущихся реакционноспособных средах. Как известно, в определенных условиях, даже слабое локальное возмущение течения может оказывать существенное изменение газодинамической структуры потока. Возможны различные способы создания локальных воздействий на течение: нагретая проволока [3], продольный электрический разряд, тонкий лазерный луч [4]. Впервые тепловой источник в виде квазистационарного плазменного образования был осуществлен в до- и сверхзвуковом потоке аргона в [5, 6]. Стабилизация подвода тепла к потоку при скорости $190 \div 430$ м/с была достигнута путем реализации пульсирующего

оптического разряда от энергии излучения CO_2 -лазера. Для осуществления квазистационарного режима подвода энергии необходимо, чтобы за время между соседними импульсами плазма существенно не распадалась и не сносилась потоком газа. В последующих исследованиях [7, 8] были детально изучены условия стабилизации оптического разряда, получена качественная и количественная информация о газодинамической структуре течения.

Для воспламенения в потоке горючих смесей используются различного типа электрические разряды (тлеющего, дугового, микроволнового, барьерного и т.п.) [1] и сфокусированное лазерное излучение, включая оптический пробой среды [1, 2].

Воспламенение и стабилизация процесса горения в высокоскоростных воздушных потоках, является важным пунктом в процессе создания камеры сгорания для высокоскоростных летательных аппаратов. Одним из возможных способов инициирования горения в высокоскоростном потоке топливовоздушной смеси является использование плазмы оптического разряда.

Применение лазерного излучения для этих целей представляет особый интерес, как для фундаментальных исследований, так и для ряда возможных практических приложений [1, 2]. 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), было показано в [2] на примере стабилизации горения водорода. В [2] отмечается, что наименее изученной остается область сверхзвуковых скоростей в диапазоне давлений выше 1 бар. Этот диапазон скоростей и давлений представляет интерес для камер сгорания высокоскоростных летательных аппаратов. При столь высоких скоростях полета только применение плазменных источников способно обеспечить объемное и быстрое воспламенение топливно-воздушной смеси за счет эффективной наработки радикалов. Поэтому представляется перспективным применение плазмы для воспламенения и стабилизации горения воздушно-топливной смеси в камерах сгорания гиперзвуковых прямоточных воздушно-реактивных и детонационных двигателей.

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 сверхзвуковом потоке при инициировании процесса импульсно-периодическим лазерным излучением [7, 8]. Управление рабочим процессом в прямоточных двигателях со сверхзвуковой скоростью в камере сгорания – главная фундаментальная задача в развитии перспективных авиационно-космических технологий. Поэтому требуются технологии, которые бы гарантировали достоверное воспламенение и устойчивое горение в сверхзвуковом потоке воздуха.

СХЕМА ЭКСПЕРИМЕНТА

Для образования лазерной плазмы оптического пульсирующего разряда (ОПР) применялся электроразрядный CO_2 -лазер ЛОК-3СГУ [9], 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 ($f = 63\text{ мм}$) на оси сверхзвуковой струи на заданном расстоянии от среза сопла. Расстояние от среза сопла в ходе экспериментов варьировалось. Топливо-воздушная смесь подавалась в форкамеру проходя через систему измерения расхода. Измерение расхода топлива и воздуха проведено отдельно. Форкамера имела внутренний диаметр 80 мм и длину 95 мм. Для формирования потока газа было использовано коническое сопло с диаметром на выходе 20 мм. Максимальное давление в форкамере 8 атм, температура 290 К. Значение числа Маха на выходе из сопла равнялось

$M = 2.0$. При мощности импульсно-периодического излучения лазера превышающей пороговое значение в области фокуса в потоке зажигался оптический пульсирующий разряд (ОПР). Гомогенная метано-воздушная (или водородо-воздушная) смесь истекала в затопленное пространство (степень нерасчетности $n = 0,9$). Были рассмотрены режимы с коэффициентом избытка воздуха в диапазоне $\alpha = 0,7 - 1,2$. Изображение фиксировалась скоростной камерой со временем экспозиции 1,5 мкс и частотой кадров 1000 1/с. Яркое собственное свечение возникающей плазмы и высокая частота следования импульсов накладывают определенные требования к системе визуализации течения. Для удобства транспортировки излучения применялся световод. Для регистрации структуры течения была использована теневая схема со щелью и плоским ножом, расположенным вдоль потока. В остальном схема регистрации типична при реализации шлирен-метода визуализации течения.

В предварительно перемешанном сверхзвуковом потоке топлива и окислителя горение поддерживается за счет образования в плазме оптического разряда имеющей высокие концентрации активных радикалов (O, H, OH, CH, C₂ и др.). Велась спектрозональная съемка на длине волны излучения радикала OH, CH, C₂. Применялась камера высокого пространственного разрешения с усилителем изображения, с частотой кадров 10 1/с и экспозицией 0,8 мс. Во избежание засветки от разряда, область регистрации была ниже по потоку от места пробы.

На рис. 1 представлена схема эксперимента. Общий вид экспериментальной установки показан на рис. 2.

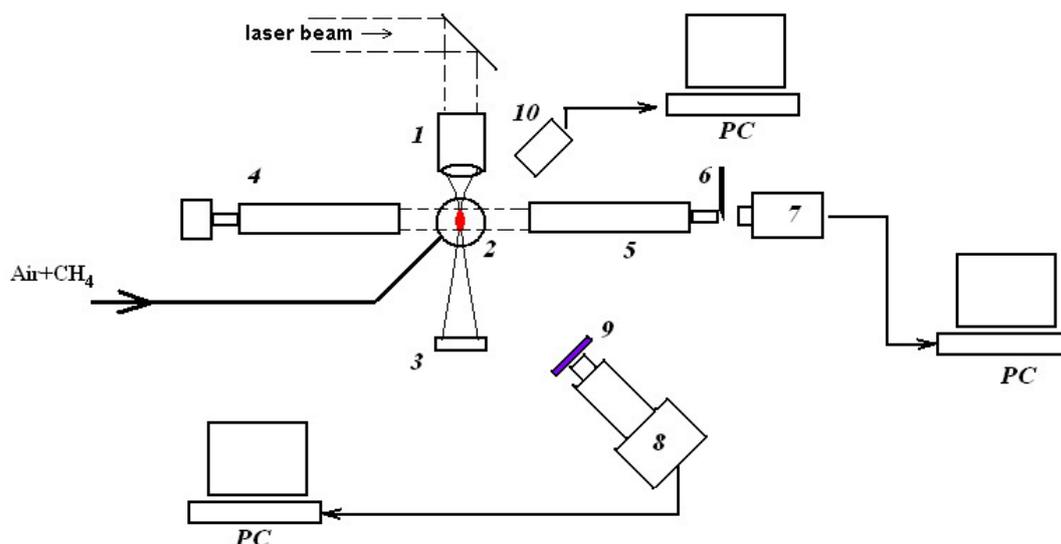


Рис.1. Схема эксперимента: 1 – линзы; 2 – горелка (сверхзвуковое сопло); 3 – поглотитель; 4, 5 – шлирен система; 6 – нож; 7 – высокоскоростная камера; 8 – камера спектрозональной съемки; 9 – интерференционный фильтр; 10 – CCD - камера

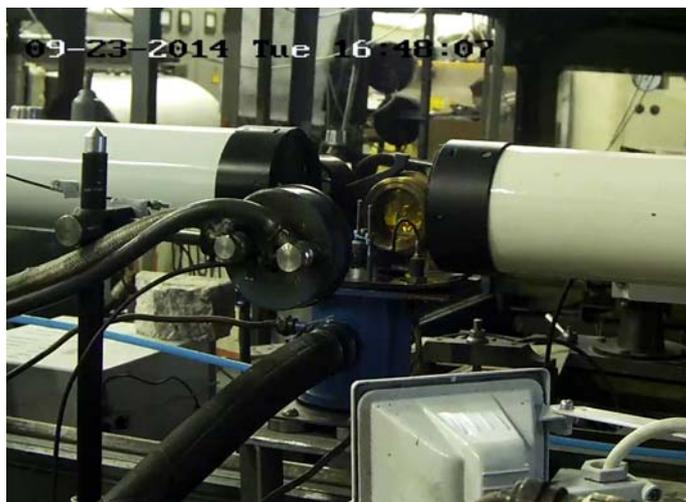
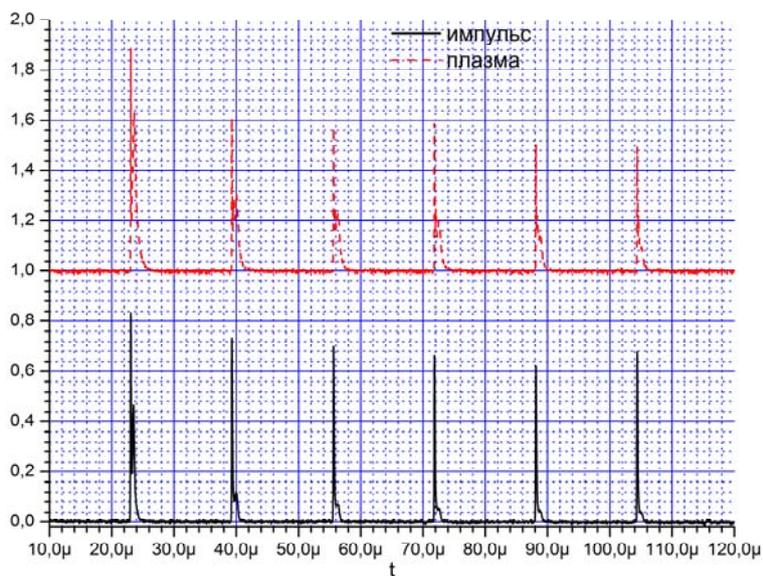
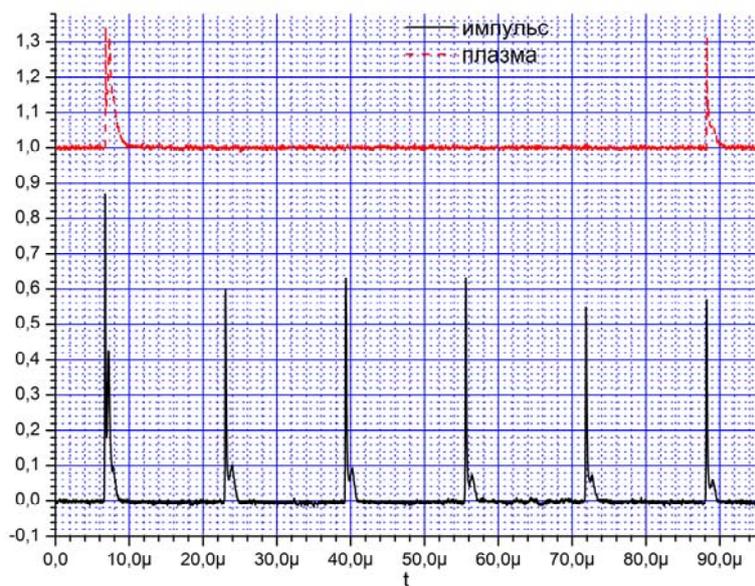


Рис.2. Общий вид эксперимента

При работе лазера в экспериментах было использовано два режима: первый (стандартный) – импульсно-периодический, второй – пакетный. Во втором режиме частота в пакете была задана $f_1 = 60$ кГц, частота следования пакетов $f_2 = 5$ кГц (в пакете 6 импульсов). Результаты, представленные на рис. 3 соответствуют пакетному режиму работы лазера. В воздушном потоке каждый лазерный импульс приводил к образованию плазмы (рис. 3, а), а добавка метана приводила к кратному увеличению порога оптического пробоя метано-воздушной среды и в метано-воздушной струе не всегда реализовывался пробой при тех же параметрах излучения плазмы (рис. 3, б).



а)



б)

Рис. 3. Излучение падающего лазерного импульса и плазмы оптического разряда. а) в воздухе; б) в смеси метан + воздух

РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕНЕВОЙ РЕГИСТРАЦИИ

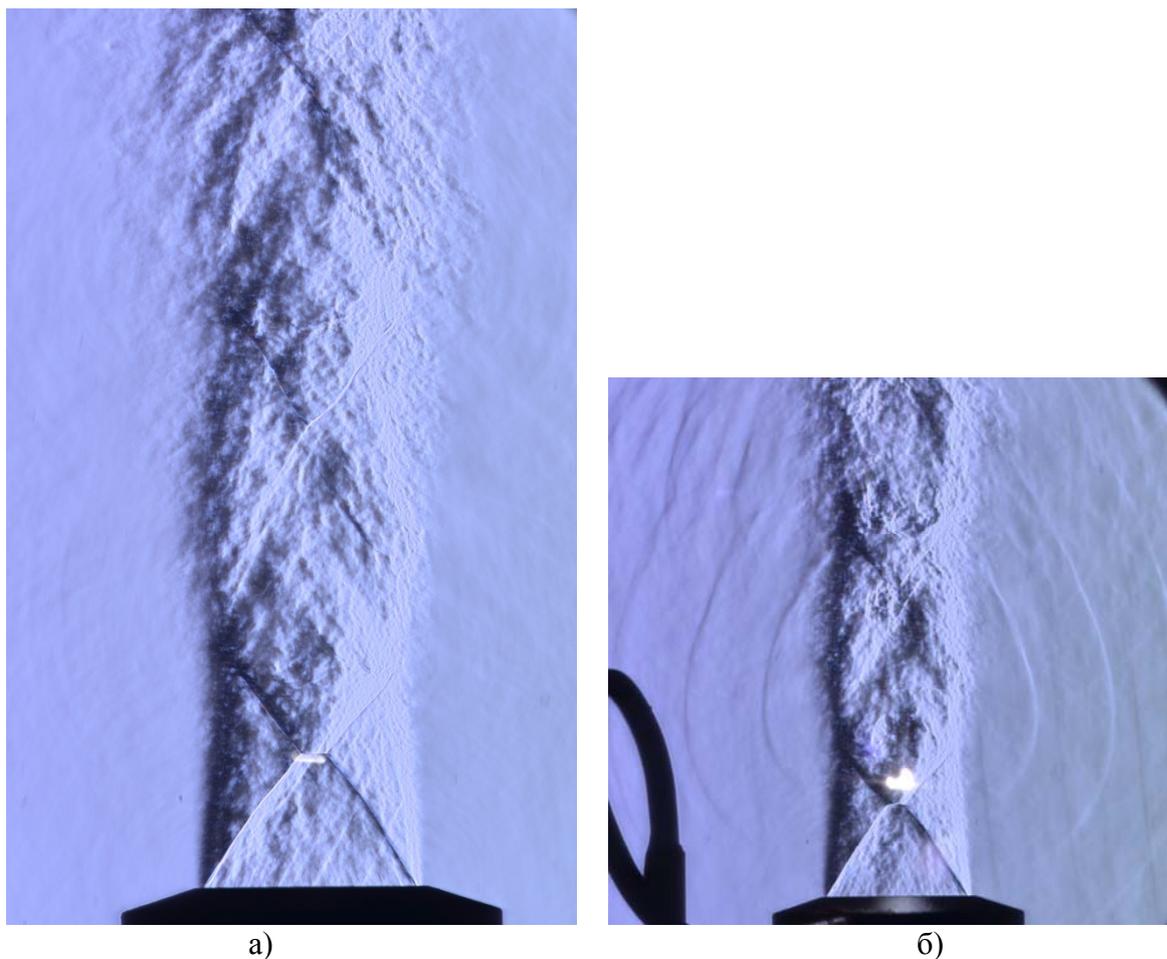


Рис. 4. Теневая регистрация течения в сверхзвуковой струе. а) оптический разряд в сверхзвуковом потоке, б) в дозвуковом потоке

В оптической схеме визуализации структуры течения применялся искровой источник подсветки (экспозиция 10 – 6 сек) с регистрацией на цифровой фотоаппарат. Это позволило резко повысить качество теневых снимков.

С более высоким разрешением была выявлена внутренняя структура сверхзвуковой затопленной струи, состоящая из скачков уплотнения, плазмоида, тепловых неоднородностей в следе за ним. В пространстве за границей струи наблюдаются периодические звуковые возмущения, частота которых соответствует частоте следования лазерных импульсов, рис. 4, б.

На рис. 5 приведены иллюстрации шлирен-фотографий оптического разряда в дозвуковом и сверхзвуковом потоках. Показана эволюция изменения состояния оптического разряда во времени. Снимки свидетельствуют о качественном изменении формы и состояния светящейся области при увеличении времени. Детали структуры хорошо видны на теневых фотографиях течения. Их анализ показывает что:

- в потоке образуется источник теплоподвода, о чем свидетельствует возникновение ударных волн почти эллиптической формы. Его размеры составляют 1,0 – 3,0 мм (при диаметре фокусировки 0,2 мм);
- за область энергоподвода развивается периодический тепловой след. Периодический характер следа зависит от частоты импульсов. Проведенные оценки показывают, что при частоте $f = 120$ кГц след становится непрерывным.

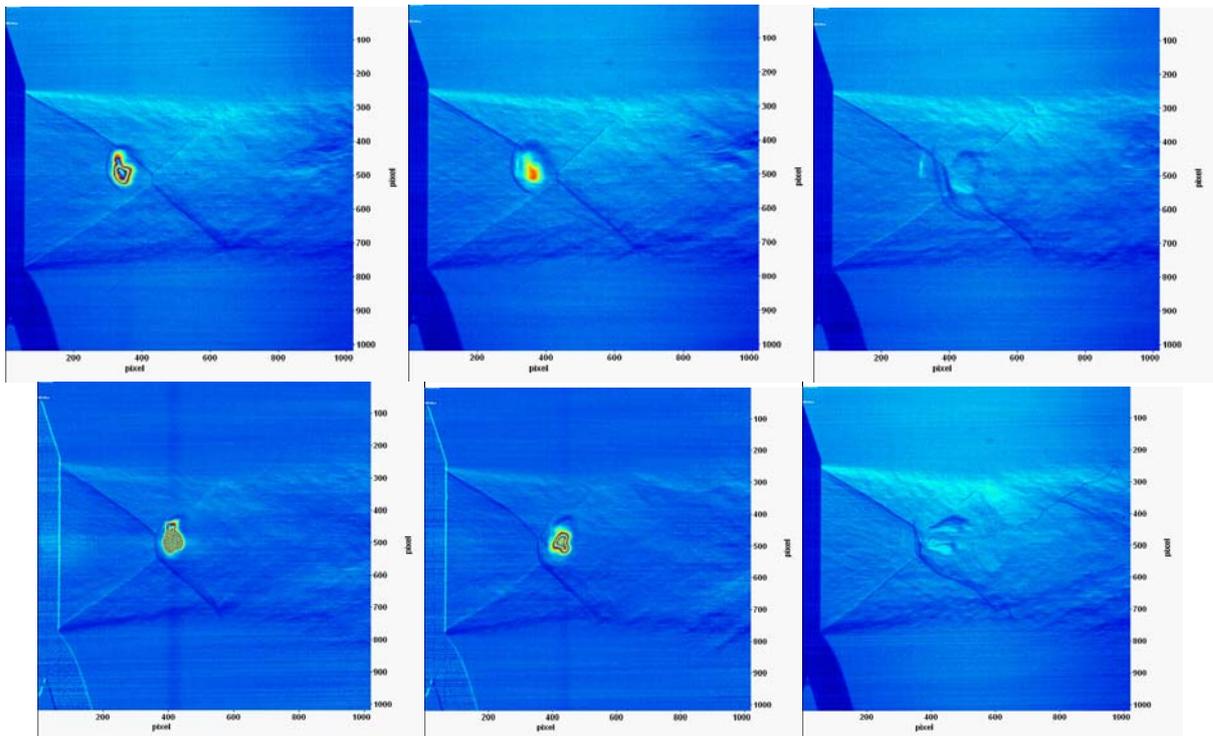


Рис. 5. Теневая регистрация течения в сверхзвуковой струе. Верх – оптический разряд в сверхзвуковом потоке, низ – в дозвуковом потоке

РЕЗУЛЬТАТЫ СПЕКТРОЗОНАЛЬНОЙ РЕГИСТРАЦИИ

В работе велась спектрозональная съемка формы зоны горения на длине радикалов ОН и СН. Для этого была задействована Imager intense CCD камера (7) с динамическим диапазоном 12 бит, пространственным разрешением 1376 x 1040 пиксел, частотой кадров 10 герц, с РС РС1 граббером, минимальной экспозицией 1 мкс. Во избежание засветки матрицы скоростной камеры от оптического разряда, область регистрации была ниже по потоку от места пробы.

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

Горение метана. Для получения данных о структуре зоны горения применялась спектрозональная съёмка на длинах волн радикалов ОН и СН. Регистрация на длине волны радикала C_2 также использовалась, но сигнал от этого радикала был на уровне шума на этой длине волны. Зона горения, выявленная в эксперименте, одинаково отображалась на обеих длинах волн (СН и ОН), что характерно для горения предварительно перемешанной углеводородно-воздушной ($CH_4 + air$) смеси, рис. 6, 7. Нижняя граница области спектрозональной регистрации находилась на расстоянии 15 – 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 – 40 мм. В опытах наблюдалось регулярное воспламенение смеси для коэффициентов избытка воздуха 0,8 – 1,2. Полученные данные свидетельствуют о локализации горения непосредственно в тепловом следе за оптическим пробоем, без распространения его на всю струю.

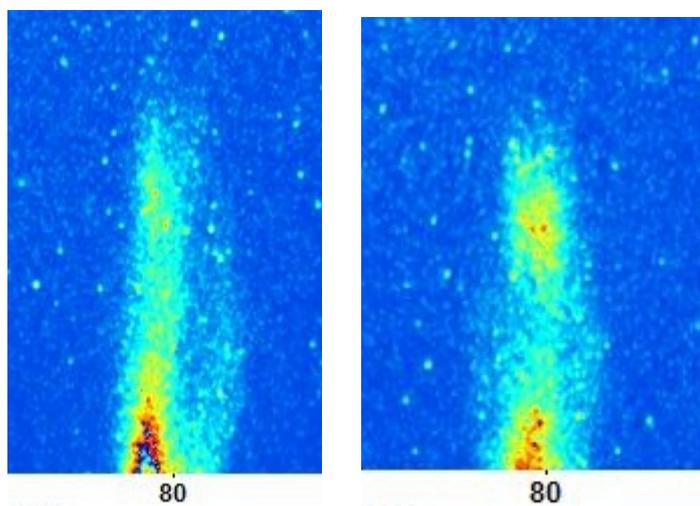


Рис. 6. Спектрозональная регистрация радикалов ОН для зоны горения (без стабилизатора)

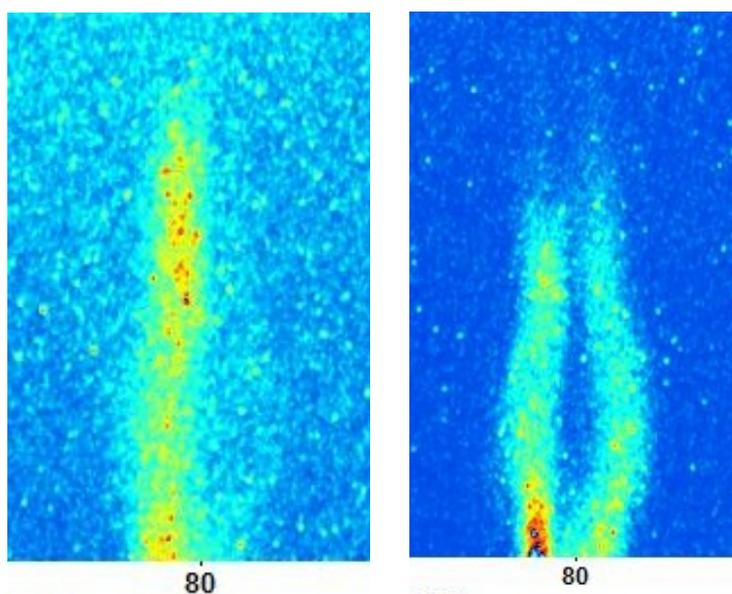


Рис. 7. Спектрозональная регистрация радикалов СН для зоны горения (без стабилизатора)

Горение водорода. В работе проведены эксперименты по воспламенению предварительно перемешанной водородо-воздушной смеси. Число Маха на срезе сопла, из которого истекала смесь, равнялось 2. Рассматривалось два случая: 1 – воспламенение и

стабилизация смеси оптическим разрядом (т.е. оптическим стабилизатором), 2 – воспламенение и стабилизация смеси оптическим разрядом, при наличии механического стабилизатора. Механический стабилизатор состоял из конуса, с углом полураствора 20 градусов и диаметром 6 мм. Оптический разряд формировался на различных расстояниях в следе от конуса. Велась тневая, спектрзональная и прямая съемка происходящих газодинамических процессов.

Получено стабильное горение в сверхзвуковом потоке, с помещенным в него коническим стабилизатором для водородо-воздушной смеси. Инициирование 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.

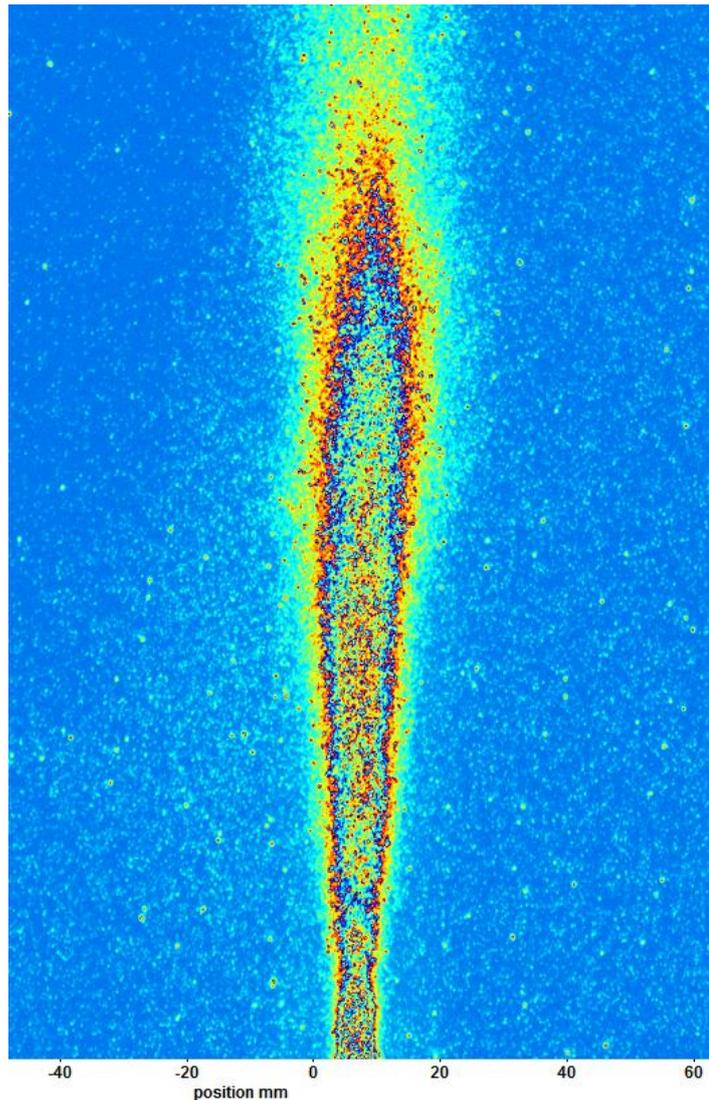


Рис. 8. Спектрзональная регистрация радикалов СН для зоны горения водорода со стабилизатором

Горение водорода в воздухе без механического стабилизатора удалось получить только в виде периодических зон горения. Результаты спектрзональной регистрации радикалов СН при горении водорода в воздухе показаны на рис. 9. Виден прерывистый режим горения. Наиболее значительные зоны горения совпадают с ударно-волной структурой скачков в сверхзвуковой струе.

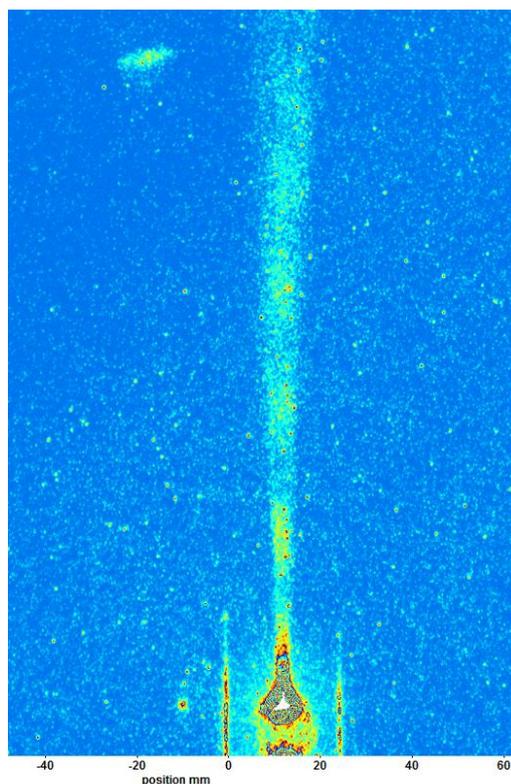


Рис. 9. Спектрозональная регистрация радикалов CN для зоны горения водорода без стабилизатора

РЕЗУЛЬТАТЫ СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКОЙ РЕГИСТРАЦИИ

Для того чтобы лучше понять процессы горения, включающие плазменные образования, в работе использовался компактный высокочувствительный спектрометр SC125, чтобы измерить излучение от плазмы и пламени. На рис. 10, 11 приводятся результаты спектрометрических измерений активных частиц – атомов и радикалов – в зоне оптического разряда. Было рассмотрено три различных случая: оптический разряд в воздухе, оптический разряд в водородовоздушной среде, оптический разряд в метановоздушной среде. Два сигнала показанные на спектрограммах (рис. 10, 11) соответствуют двум отсчетам во времени. Они полностью совпадают друг с другом и отличаются только величиной интенсивности сигнала.

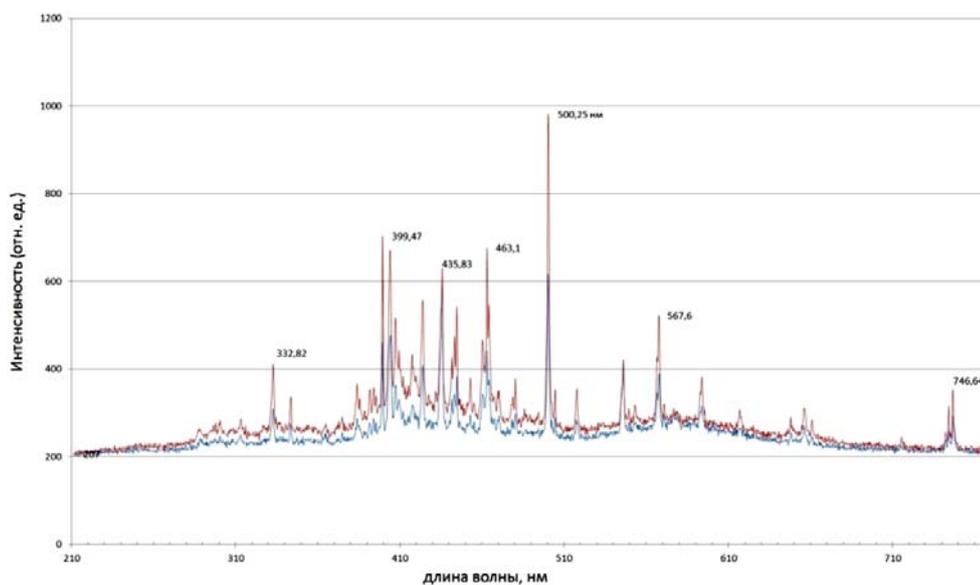


Рис.10. Спектрометрическая регистрация оптического разряда в воздухе

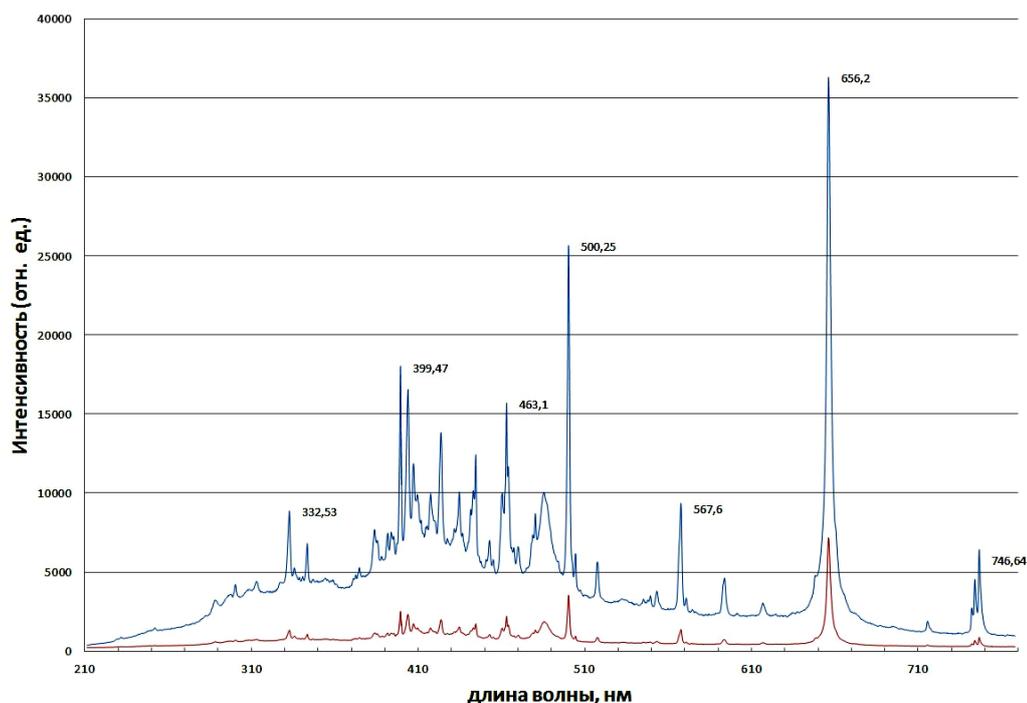


Рис.11. Спектрометрическая регистрация оптического разряда при горении водорода в воздухе

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 энерговыделения. При малых частотах следования импульсов лазерного излучения взаимодействие теплового пятна с потоком происходит в импульсном режиме.
- Экспериментально показана возможность воспламенения оптическим разрядом метано-воздушной и водородо-воздушной смеси при сверхзвуковом истечении в затопленное пространство. Результаты спектрозональной съемки свидетельствуют о протекании реакций горения в следе за областью оптического разряда.

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

M – число Маха;
 T – температура, K ;
 f – частота импульсов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Leonov S B, Yarantsev D A. Plasma-induced ignition and plasma-assisted combustion in high-speed flow // Plasma Sources Sci. Technol. 16, 2007. P. 132-138.
2. Tran X. Phuoc. Laser-induced spark ignition fundamental and applications (Review) // Optics and Lasers in Engineering 44, 2006. P. 351-397.
3. Артемьев В.И., Бергельсон В.И., Немчинов И.В. и др. Эффект «тепловой иглы» перед затупленным телом в сверхзвуковом потоке// ДАН СССР, 1990. Т. 1. С. 47-50.
4. Витковский В.В., Грачев Л.Н., Грицов Н.П. и др. Исследование нестационарного обтекания тел сверхзвуковым потоком воздуха, подогретым продольным электрическим

разрядом// ТВТ, 1990. Т. 28. № 6. С. 1156-1163.

5. 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.

6. Третьяков П.К., Гаранин А.Ф., Грачев Г.Н., Крайнев В.Л., Пономаренко А.Г., Тищенко В.Н., Яковлев В.И. Управление сверхзвуковым обтеканием тел с использованием мощного оптического пульсирующего разряда// Докл. РАН, 1996. Т. 351. № 3. С. 339-340.

7. 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.

8. Зудов В.Н., Третьяков П.К., Тупикин А.В. Воздействие лазерного излучения и электрического поля на горение углеводородовоздушных смесей // ФГВ, 2009. Т. 45. № 4. С. 77-85.

9. Багаев С.Н., Г.Н. Грачев, А.Г. Пономаренко, и др. Лазерный плазмохимический синтез наноматериалов в скоростных потоках газов, первые результаты и перспективы развития метода.// Наука и нанотехнологии, изд. СО РАН, Новосибирск, 2007. С. 123-135.

V.N. Zudov, P.K. Tretyakov, A.V. Tupikin

*Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS, Russia,
630090, Novosibirsk, Institutskaya st., 4/1, E-mail: zudov@itam.nsc.ru*

IGNITION AND STABILIZATION BY THE OPTICAL DISCHARGE OF HOMOGENEOUS BURNING IN HIGH-SPEED JET

The experimental research of influence of focused impulsno-periodic radiation CO_2 – the laser on initiation and development of process of distribution of burning in to – and a supersonic stream homogeneous fuel-air of mixes ($H_2 + air$, $CH_4 + air$) is spent. Radiation CO_2 -lasera extended across a stream and was focused by a lens on an axis of a supersonic stream. The shadow scheme was applied to registration of structure of a current with a crack and the flat knife located along a stream. The image it was fixed by the high-speed chamber in due course expositions $1.5 \mu s$ and frequency of shots 1000 1/s. The structure of a zone of burning on an example of own luminescence of a flame on lengths of waves of radicals OH and CH is studied. In the spent experiments by methods of issue spectroscopy distribution of intensity of radiation a component in the field of the optical category has been investigated.

THE OPTICAL DISCHARGE, HOMOGENEOUS COMBUSTION, COMBUSTION, SUPERSONIC NONISOBARIC JET, MULTISPECTRAL INVESTIGATIONS, SCHLIEREN REGISTRATION, SPECTROSCOPY