

03:09

## Исследование спектральных характеристик оптического разряда в высокоскоростной метановоздушной струе

© В.Н. Зудов

Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича  
СО РАН, Новосибирск  
E-mail: zudov@itam.nsc.ru

Поступило в Редакцию 2 февраля 2017 г.

Приведены результаты газодинамических и спектроскопических исследований оптического разряда в до- и сверхзвуковом потоке гомогенных топливно-воздушных смесей ( $\text{CH}_4 + \text{air}$ ). Для инициирования и стабилизации горения был использован оптический разряд, создаваемый  $\text{CO}_2$ -лазером. Излучение  $\text{CO}_2$ -лазера распространялось поперек потока и фокусировалось линзой на оси сверхзвуковой струи ( $M = 2$ ). Методами эмиссионной спектроскопии получены данные о составе излучающих продуктов и интенсивности излучения компонент в области оптического разряда. Приведены результаты тепловской визуализации структуры течения. Для регистрации структуры течения применялась теневая схема. Изображение фиксировалась скоростной камерой со временем экспозиции  $1.5 \mu\text{s}$  и частотой кадров  $1000 \text{ s}^{-1}$ .

DOI: 10.21883/PJTF.2017.12.44704.16731

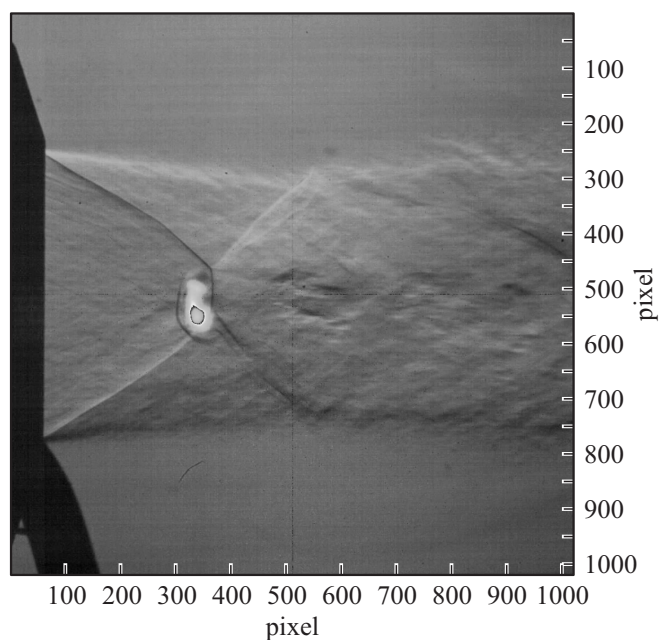
В последние годы ведутся многочисленные исследования по применению плазменных образований для инициирования и стабилизации горения в высокоскоростных потоках топливно-воздушных смесей. Интерес к возможности управления процессом горения путем внешнего энергетического воздействия обусловлен как большими затруднениями по воспламенению топливно-воздушных смесей в высокоскоростном потоке, так и повышением требований к содержанию вредных примесей в продуктах сгорания технологических устройств, в том числе двигателей различного назначения. При высоких скоростях полета применение плазменных источников способно обеспечить объемное и

быстрое воспламенение топливно-воздушной смеси за счет образования в плазме активных радикалов (O, H, OH, CH и др.) [1–4].

Нужно отметить, что спектроскопические исследования, представленные здесь, не использовались для того, чтобы определить концентрацию различных компонент в пределах плазмы, они, скорее, преследовали цель обеспечить оценку того, какие типы компонент присутствуют в пределах такой плазмы. Цель данной работы состояла в спектрометрической регистрации оптического разряда, созданного сфокусированным лазерным излучением с длиной волны  $\sim 10.6 \mu\text{m}$  и длительностью импульса  $1 \mu\text{s}$  в высокоскоростном потоке (воздух, гомогенные топливно-воздушные смеси ( $\text{CH}_4 + \text{air}$ )) при нормальном атмосферном давлении.

Для образования лазерной плазмы оптического пульсирующего разряда (ОПР) применялся электроразрядный  $\text{CO}_2$ -лазер ЛОК-3СГУ (разработан в Институте лазерной физики СО РАН), который в опытах обеспечивал импульсно-периодический режим излучения с частотой следования импульсов до 60 kHz и средней мощностью до 2.5 kW. При мощности импульсно-периодического излучения лазера, превышающей пороговое значение в области фокуса, в потоке зажигался ОПР. Излучение  $\text{CO}_2$ -лазера распространялось поперек потока и фокусировалось линзой из ZnSe ( $f = 63 \text{ mm}$ ) 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 раздельно. Форкамера имела внутренний диаметр 80 mm и длину 95 mm. Для формирования сверхзвукового потока газа было использовано коническое сопло с диаметром на выходе 20 mm. Максимальное давление в форкамере 8 atm, температура 290 K. Значение числа Маха на выходе из конического сопла равнялось  $M = 2.0$ . Гомогенная метановоздушная 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 фиксировалось скоростной камерой со временем экспозиции  $1.5 \mu\text{s}$  и частотой кадров  $1000 \text{ s}^{-1}$ . Для транспортировки излучения применялся световод. Для регистрации структуры течения была использована теневая схема со щелью и плоским ножом, расположенным вдоль потока.

2\* Письма в ЖТФ, 2017, том 43, вып. 12



**Рис. 1.** Шлирен-регистрация оптического разряда в сверхзвуковой воздушной струе.

При работе лазера в экспериментах было использовано два режима: первый (стандартный) — импульсно-периодический, второй — пакетный. Во втором режиме частота в пакете была задана  $f_1 = 60$  kHz, частота следования пакетов  $f_2 = 5$  kHz (в пакете 6 импульсов). На снимках (рис. 1) представлены результаты регистрации теплового пятна в потоке воздуха ( $M = 2.0$ ). На рисунке представлены сверхзвуковая струя с характерной структурой ударных волн и плазменное образование, сформированное сфокусированным лазерным излучением. Был использован второй режим работы лазера. Направление потока слева направо, лазерный луч поперек потока. Представленные данные являются примером развития оптического пробоя среды. За оптическим разрядом, вниз по потоку, наблюдается след, который состоит из отдельных тепловых пятен. Стационарных ударных структур не образуется,

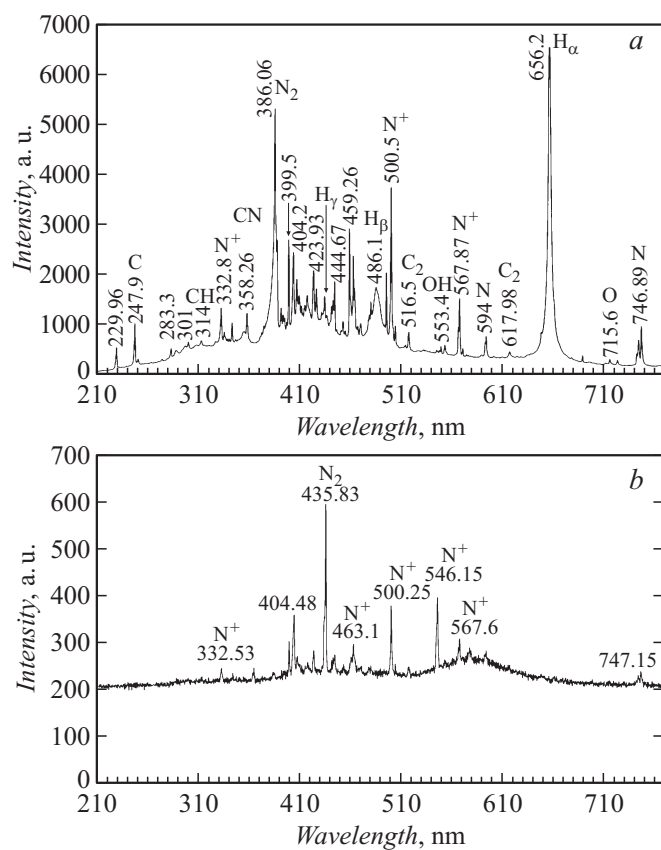
что свидетельствует о восстановлении невозмущенного потока между импульсами. Только перед оптическим разрядом наблюдается головной скачок уплотнения (рис. 1).

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 инициирования воспламенения топливно-воздушной смеси были выполнены на заданном расстоянии от среза сверхзвукового сопла. Регистрация спектра проводилась в диапазоне от 210 до 770 nm при спектральном разрешении (среднее значение) 1 nm. Спектры записывались на персональный компьютер.

На рис. 2 приводятся результаты спектрометрических измерений активных частиц — атомов и радикалов — в области формирования оптического разряда. Производилась регистрация спектров во времени. Экстремумы сигналов во времени полностью совпадают друг с другом и отличаются только величиной интенсивности сигнала. На рис. 2 представлены спектры с максимальной интенсивностью.

На рис. 2, *a* показана спектрограмма, используемая для идентификации возбужденных компонент в метановоздушной плазме. Давление в форкамере равно 9 atm, а давление в окружающей атмосфере 1 atm. Главные пики маркированы в соответствии компонентам, производящим спектральные пики. Преимущественно анализировались распределения интенсивности излучения радикалов  $C_2$ , CN, CH, OH, молекулярного азота и атомарных водорода, кислорода, азота.

Идентификация водорода обычно облегчается присутствием сильных водородных линий серии Бальмера, которые были зафиксированы в эксперименте. Одной из опознаваемых особенностей спектрограммы метана является присутствие сильной атомной углеродистой линии 247.8 nm и первых трех линий серии Бальмера для атомарного водорода  $H_\alpha$  (656.3),  $H_\beta$  (486.2), и  $H_\gamma$  (434.1) nm. Линия  $H_\delta$  (410.17) nm также присутствует, но более слабо, чем первые три, и она замаскирована эмиссией возбужденных молекул CN в районе 410 nm. Линии серии Бальмера для атомарного водорода присутствуют почти во всех углеводородных пламенах и они чрезвычайно ярки. Из них линия  $H_\alpha$  в 656.3 nm является самой сильной. Были обнаружены двухатомные компоненты, такие как  $C_2$ ,  $N_2$  и CH. В ядре плазменного образования обнаружены полосы молекул  $C_2$  (полосы Свана), соответствующие



**Рис. 2.** Спектр оптического разряда в метановоздушной (а) и в воздушной струе (b).

длинам волн 438.3, 473.7, 516.5, 619.1 nm. Из литературы известно [2–7], что появление радикала  $C_2$  наблюдается вблизи зоны максимальной температуры. Идентификация незначительных компонент, таких как  $C_2$ , также необходима, потому что они могут участвовать в качестве третьего тела в химических реакциях, в которых могут быть произведены радикалы, улучшающие горение.

В дополнение к сильным системам полос Свана более слабая система группы  $C_2$  находится вблизи 410 nm. Она частично перекрывается CN и  $H_\delta$  и обычно наблюдается при высокотемпературных условиях.

Радикал CN — общее промежуточное звено в реагирующих химических системах с углеводородами. Эмиссионный спектр молекулы CN в видимой и близкой ультрафиолетовой области содержит три системы: 430 nm ( $A^2\Delta - X^2\Pi$ ), 390 nm ( $B^2\Sigma^- - X^2\Pi$ ) и 314.3 nm ( $C^2\Sigma^+ - X^2\Pi$ ). Их интенсивности уменьшаются в порядке, в котором они даются. Система 314.3 nm является самой слабой. Полоса CN обычно присутствует в разрядах, где есть углерод и водород. Система группы на 430 nm, показанная на рис. 2, а, безусловно, является самой яркой. Сильная линия  $H_\gamma$  частично затеняет группу CN при 431.4 nm. Менее развитые, но сильные пики этой системы были обнаружены при 431.4, 432.3 и 438.5 nm. Свободный радикал CN — очень важная двухатомная молекула, которая играет существенную роль во многих химических реакциях для любого высокотемпературного газа, содержащего C и  $N_2$ . Самое сильное испускание для CN происходит в спектральной области 380–388 nm. Наличие CN можно заметить на правом склоне полосы  $N_2$  (386 nm). Необходимо отметить, что присутствие OH, CH, CN,  $C_2$  не указывает на реакции горения непосредственно. Эти молекулы могут быть произведены в результате оптического разряда. Гидроксильный радикал OH также наблюдался в данном эксперименте, но интенсивность его была слабой. Обычно он дает систему полос, из которых самая сильная 306.4 nm.

Из приведенных на рис. 2 данных видно, что в плазмоиде присутствует сильное излучение  $N_2$  (386, 399.8 nm, вторая положительная система,  $C^3\Pi_u - B^3\Pi_g$ ). В интервале 322–567 nm наблюдается излучение иона азота  $NI$  (332.8, 500.5, 567.8 nm). Особо следует отметить специфику свечения атомов  $NI$  и  $OI$ . В плазмоиде можно выделить линию атома азота  $NI$  (746.89 nm). Свечение атома  $OI$  наблюдалось при 715.6 nm. Но известно [5–7], что самая сильная линия атома кислорода  $OI$  находится на 777.3 nm соответственно.

Суммируя все вышеизложенное, можно сказать, что измерено излучение оптического пробоя в сверхзвуковом потоке и определены основные типы радикалов, присутствующих в метановоздушной плазме. Спектры излучений идентифицированных компонентов плазмы углеводорода состояли из  $N_2$ ,  $NI$ ,  $NI$ ,  $H_\alpha$ ,  $H_\beta$ , O,  $C_2$ , C, CH, CN. Отмеченное

наличие линий иона азота NII, обусловленных каскадным процессом высвечивания преимущественно с сохранением спина при переходе электрона с верхних оболочек, например  $4f \rightarrow 3s$ . Метановоздушная плазма испускала очень сильные линии H, самая сильная из них находилась в 656.46 nm.

Излучение линии от лазерной искры, созданной в воздухе, состояло главным образом из линий от N<sub>2</sub>, NII, которые располагались от 330 до 710 nm (рис. 2, b). Для эмиссионных линий иона азота NII сильные испускания наблюдались в пределах 332.53, 404.48, 463.1, 500.25, 546.15, 567.6 nm. Для молекулярного азота N<sub>2</sub> наблюдалось излучение линии в 435.8 nm. В рассмотренном диапазоне 210–710 nm интенсивных линий O не обнаружено. Как показано в [5–7], наиболее интенсивные линии O наблюдаются в диапазоне 777.19, 777.3, 777.6 nm.

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

## Список литературы

- [1] Зудов В.Н., Грачев Г.Н., Крайнев В.Л. и др. // Физика горения и взрыва. 2013. Т. 49. № 2. С. 144–147.
- [2] Phuoc T.X., White F.P. // Combust. Flame. 1999. V. 119. N 3. P. 203–216.
- [3] Beduneau J.-L., Ikeda Y. // Exp. Fluids. 2004. V. 36. P. 108–113.
- [4] Ferioli F., Buckley S.G. // Combust. Flame. 2006. V. 144. P. 435–447.
- [5] Малов А.Н., Оришич А.М. // Квантовая электроника. 2015. Т. 45. В. 10. С. 973–978.
- [6] Phuoc T.X., White C.M. // Opt. Commun. 2000. V. 181. P. 353–359.
- [7] Camacho J.J., Santos M., Díaz L. et al. // Appl. Phys. A. 2010. V. 99. P. 159–175.