

УДК 536.46

ВЛИЯНИЕ ВОДОРОДА НА ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МЕТАНОВОЗДУШНОГО ПЛАМЕНИ

В. А. Арбузов, Э. В. Арбузов, Ю. Н. Дубнищев, О. С. Золотухина,
В. В. Леманов, В. В. Лукашов, А. В. Тупикин, К. А. Шаров

Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, 630090 Новосибирск,
Luka@itp.nsc.ru

В работе представлены результаты исследования влияния разбавления метана водородом на электрохимические свойства пламени. Были рассмотрены как диффузионные пламена, так и горение предварительно перемешанной смеси в горелке Бунзена. Установлено, что для смесей с молярной долей метана в топливе более 40 % величина электрического тока линейно зависит от количества метана. При молярной доле метана в смеси менее 40 % зависимость становится нелинейной. Граница перехода от линейной к нелинейной связи величины протекающего тока и количества метана в топливной смеси не зависит от скорости потока, формы электродов и режима горения (диффузионное, предварительно перемешанная топливно-воздушная смесь). Регистрация хемилюминесценции радикала CH^* демонстрирует аналогичную зависимость интенсивности свечения пламени от объемной доли метана в топливе.

Ключевые слова: топливная смесь CH_4/H_2 , диффузионное пламя, горелка Бунзена, электрохимия, хемилюминесценция CH^* .

DOI 10.15372/FGV2023.9421

EDN OTINIJ

ВВЕДЕНИЕ

Развитие промышленного производства приводит к тому, что потребности в энергии растут, и с уменьшением мировых запасов природных энергоносителей на первый план выходит проблема энергоэффективности. Кроме того, повышаются требования экологической безопасности к технологическим установкам. Международное энергетическое агентство, в которое входят США, Австралия, Япония и др., поставило задачу к 2050 г. (Парижское соглашение) использовать в качестве энергоносителя до 80 % возобновляемых источников энергии и вдвое сократить выбросы CO_2 в атмосферу. Хотя Россия не ратифицировала Парижское соглашение, в сентябре 2021 г. была одобрена «Стратегия социально-экономического развития Российской Федерации с низкими выбросами парниковых газов до 2050 года». В связи с этим становится актуальной разработка газотурбинных систем, способных эффективно работать на смесях углеводородного топлива с водородом [1] в диапазоне концентраций водорода в топливной смеси 0 ÷ 100 %. Исследования двигателей с искровым зажиганием, работающих на смесях водорода с природным газом [2, 3], показали, что использование смеси водород/метан вместо чистого водорода повышает эффективность двигателей. В настоящее время основное внимание уделяется сжиганию топливных смесей H_2/CH_4 . Детальное исследование кинетики горения смеси CH_4/H_2 проведено в [4]. В частности, в [4] отмечается, что и CH_4 , и H_2 расходуются в основном в элементарных реакциях с радикалами O, H, OH, CN. Известно, что CN является маркером зоны, где протекает реакция, а OH указывает на область пламени, где реакция

уже прошла. В реакциях с О, Н или ОН по мере увеличения содержания H_2 в топливе суммарная молярная скорость реакций с участием CH_4 уменьшается, а с участием H_2 увеличивается. Среди элементарных реакций, в которых потребляется водород, наиболее важной является реакция взаимодействия с ОН, которая представляет собой реакцию распротранения цепи. В результате образуются H_2O и Н. Скорость этой реакции нелинейно возрастает с добавлением водорода в поток топлива.

Уильям Гилберт (конец XVI в.) первым продемонстрировал наличие электрических свойств в пламени. Как оказалось, электрические свойства пламени сильно зависят от вида топлива. Углеводородные пламена наиболее чувствительны к электрическому полю. Это связано с наличием реакций хемоионизации, приводящих к сверхравновесным концентрациям зарядов. Согласно [5] модель простой реакции хемоионизации имеет вид $\text{CH} + \text{O} \rightarrow \text{CHO}^+ + e^-$, где ион CHO^+ довольно быстро переходит в продолжение цепей: $\text{CHO}^+ + \text{X} \rightarrow \text{HX}^+ + \text{CO}$ (например, $\text{CHO}^+ + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_3\text{O}^+ + \text{CO}$). Существует множество различных цепочек реакций с образованием ионов, в том числе отрицательных [6–9] (в углеводородном пламени идентифицировано около 50 типов различных ионов). И хотя авторы [10] считают, что движение отрицательных ионов играет важную роль, в абсолютном большинстве исследований отрицательный заряд переносится в значительной степени электронами, а положительный заряд — ионами (преимущественно H_3O^+). И основной эффект заключается в изменении подвижности носителей заряда, что при приложении электрического поля создает гидродинамический дисбаланс, приводящий к изменению формы и условий стабилизации пламени. Современные подробные кинетические механизмы одномерного (распространяющегося в одном направлении) метановоздушного пламени с учетом хемоионизации представлены в работах [11–13]. Как правило, проверка работоспособности изучается на ударных трубах при воспламенении за отраженной ударной волной [14]. Наличие внешнего электрического поля накладывает свои особенности на процессы в реагирующих смесях.

Для моделирования турбулентных реагирующих потоков применяют упрощенные подходы. Влияние добавления водорода на динамику стабилизированного водородно-метанового турбулентного пламени рассматривалось в [15] с использованием метода LES. Моделирование химического реагирования проводилось с помощью редуцированного кинетического описания пламени, основанного на так называемом глобальном механизме. В качестве эталона для калибровки этого механизма взяты подробные кинетические механизмы UCSD и хорошо известная система DRM-19 [16].

Использование бесконтактных методов, таких как PIV (Particle Image Velocimetry), PLIF (Planar Laser Induced Fluorescent), и спектроскопической визуализации на длине излучения радикалов OH^* , CH^* , C_2^* позволило [17] сформулировать гипотезу о локализации воздействия электрического поля в области горения. Доказательства в пользу такого утверждения, основанные на результатах экспериментальных и вычислительных исследований, представлены в [18, 19]. Таким образом, положительные ионы присутствуют исключительно во фронте пламени (в зоне реакции), а их концентрация определяется реакциями хемоионизации, запускающими реакции с участием радикала CH . Согласно результатам работы [10] наличие внешнего электрического поля не влияет на кинетику реакций, хотя концентрации заряженных частиц и нейтралов имеют однозначную связь друг с другом. Внешнее электрическое поле не только влияет на гидродинамические и теплофизические процессы при горении, но и может служить инструментом исследования пламени.

Другим (после хемоионизации) интересным аспектом горения топлив, содержащих углеводороды, является хемилюминесценция, на основе которой разрабатываются методы спектральной диагностики. Сравнение PLIF и спектроскопической регистрации было проведено в [20]. Оба этих оптических метода имеют ограничения из-за проблем с коли-

чественной оценкой характеристик пламени. Метод PLIF радикала ОН является наиболее развитым, поскольку спектроскопическая доступность ОН (переходы электронного возбуждения ОН можно активировать с помощью доступных лазерных источников) делает этот метод доминирующим в диагностике горения. Радикал ОН признан одним из важнейших при горении углеводородов, поскольку участвует в процессах горения, реакциях разветвления критической цепи, поддерживающих пламя. Именно поэтому хемилюминесценция OH^* лежит в основе методов определения зон горения и положения фронтов пламени. Известно, что при горении бедных смесей углеводородов соотношение интенсивностей собственного свечения пламени на радикалах CH^* и OH^* ($S_{\text{CH}^*}/S_{\text{OH}^*}$) может определять коэффициент избытка топлива [21]. Однако соотношение интенсивностей излучения, приходящегося на радикалы CH^* и OH^* , сильно зависит от давления и температуры. Хотя при атмосферном давлении соотношение $S_{\text{CH}^*}/S_{\text{OH}^*}$ монотонно увеличивается с увеличением коэффициента избытка топлива, при высоких давлениях можно наблюдать уменьшение $S_{\text{CH}^*}/S_{\text{OH}^*}$ с ростом содержания топлива в горючей смеси [21]. И все же в нормальных условиях это соотношение может быть полезно для диагностики сгорания метана. Поэтому одной из задач было определение зависимости интенсивности свечения пламени от радикалов CH^* и OH^* при изменении состава смеси H_2/CH_4 . Цель настоящего исследования — определение влияния состава топливной смеси на хемилюминесценцию и электропроводность диффузионного пламени, а также выявление связи между концентрацией радикалов CH^* и степенью ионизации во фронте пламени.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Схема организации экспериментальных исследований представлена на рис. 1. Диффузионный факел формировался при истечении ламинарной струи топлива из кварцевой трубки с внутренним диаметром 3 мм (рис. 1, б). На высоте 10 мм от края трубки симметрично относительно оси струи располагались два электрода на расстоянии 11 мм друг от друга. Электроды представляли собой цилиндры диаметром 5 мм, концы которых имели либо коническую форму с углом раствора 45° , либо полусферическую форму и располагались вне зоны реакции (16 на рис. 1). Источник питания ($U = 1.5 \text{ кВ}$) работал в импульсно-

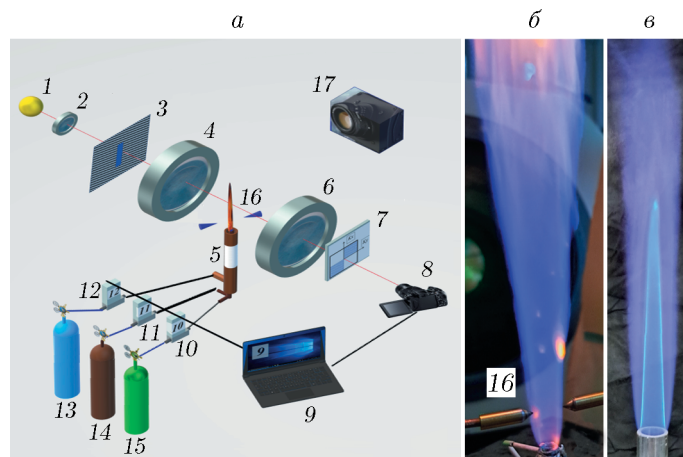


Рис. 1. Схема экспериментальной установки (а), фотографии диффузионного пламени (б) и пламени предварительно перемешанной смеси (в):

1 — источник света, 2 — коллиматорная линза, 3 — щелевая диафрагма, 4, 6 — линзы, 5 — горелка, 7 — квадрантный фильтр Гильберта, 8, 17 — цифровые видеокамеры, 9 — компьютер, 10–12 — цифровые регуляторы, 13–15 — цилиндры, 16 — электроды

периодическом режиме с частотой $f = 2$ Гц и длительностью $\Delta\tau \approx 13 \div 15$ мс. При подаче напряжения на цепь пламя отклонялось в сторону катода. Ток, протекающий через пламя, регистрировался на осциллографе. Аналогично измерения проводились в пламени горелки Бунзена (рис. 1, в). Для визуализации структуры течения использовался метод гильбертовой диагностики полей фазовой оптической плотности [22]. В нашей работе применялся диагностический комплекс, реализованный на базе теневого оптического прибора ИАБ-463М с доработанными узлами формирования зондирующего поля и гильбертовой фильтрации. В состав оптического комплекса входит модуль подсветки, состоящий из источника света 1, коллиматорной линзы 2 и щелевой диафрагмы 3, расположенных в передней фурье-плоскости линзы 4, образующих зондирующее поле. Спектр Фурье фазовых возмущений, наведенных в зондирующем поле пламенем горелки 5, локализован в частотной плоскости линзы 6, где расположен квадрантный фильтр Гильберта 7, ориентация которого согласована с апертурой 3. Линза цифровой видеокамеры 8 осуществляет обратное преобразование Фурье отфильтрованного оптического сигнала. Поля оптической фазовой плотности, регистрируемые камерой, обрабатываются компьютером 9. Состав смеси газов, поступающей из цилиндров 13–15 в горелку 5, задавался с помощью цифровых регуляторов 10–12. Фотографии диффузионного пламени (б) и пламени предварительно перемешанных компонентов (в) также показаны на рис. 1. Преобразование Гильберта обладает свойством перераспределения энергии оптического сигнала из области низких пространственных частот в область высоких частот. При регистрации результата гильбертовой фильтрации фотоматрицей фазовая оптическая плотность визуализируется в виде квазипериодических структур (полос Гильберта), содержащих информацию об экстремумах и градиентах фазовой оптической плотности исследуемой среды, и значения экстремумов функции преобразуются в «широкие» темные полосы.

Электронно-оптической цифровой камерой NANOGATE-24/3 измерялись интенсивности собственного свечения в пламени радикалов CH^* и OH^* (17 на рис. 1, а). Для выделения необходимого диапазона длин волн излучения радикалов использовались интерференционные фильтры. Эксперименты проводились при числах Рейнольдса $\text{Re} = 2000$, вязкость топливной смеси оценивалась согласно [23]. Длина трубки составляла 200 калибров, что обеспечивало течение Пуазейля в трубке с параболическим распределением скоростей. Параметры режимов приведены в подрисуночных подписях, где X_{H_2} и X_{CH_4} — молярные доли водорода и метана в топливной смеси. Во всех рассмотренных режимах изучалось ламинарное присоединенное пламя.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Высокоскоростная видеозапись с частотой 2 кГц позволила провести визуализацию факела при импульсном воздействии электрического поля. На рис. 2 представлены гильберт-изображения перед включением поля (а), во время электрического импульса (б) и после отключения поля (в).

Тепловые возмущения сохраняются после снятия напряжения с электродов в течение некоторого времени. Разбавление метана водородом приводит к уменьшению влияния электрического поля на пламя. Анализ смещения положений полосы Гильберта в радиальном направлении (рис. 2, з) позволяет охарактеризовать динамику фронта пламени и величину растяжения пламени: $K = \frac{1}{A} \frac{dA}{d\tau} \approx \frac{1}{R} \frac{dR}{d\tau}$, где K характеризует деформацию поверхностного элемента, A — площадь участка фронта пламени, R — радиальная координата фронта пламени, τ — время. Полученные оценки показывают, что при импульсном воздействии электрического поля на диффузионное пламя топливной смеси CH_4/H_2 с объемным содержанием водорода 25 % ($X_{\text{H}_2} = 0.25$) значение K составляет менее 50 с^{-1} .

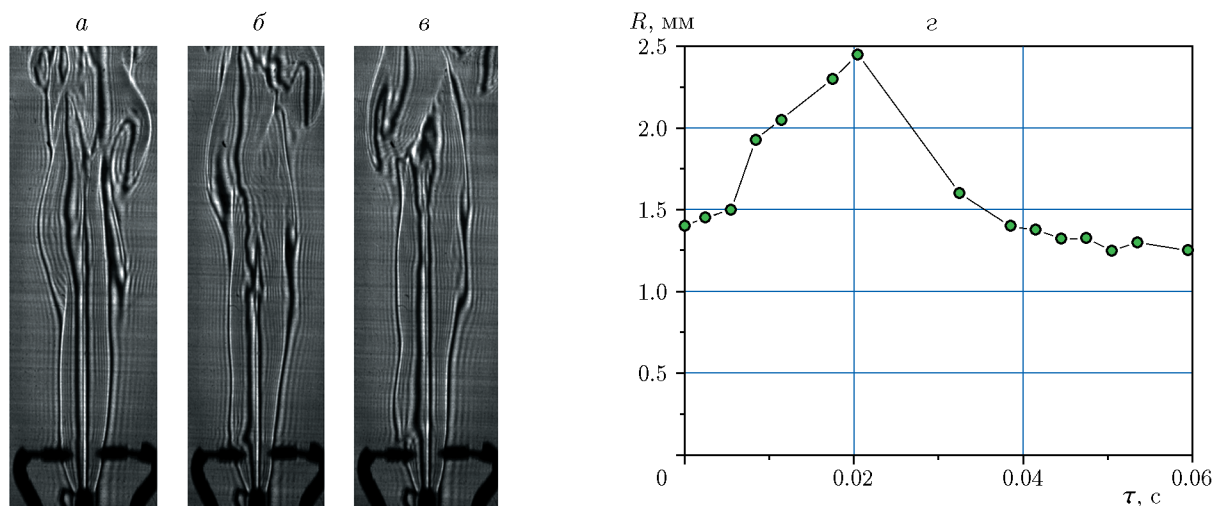


Рис. 2. Пламя диффузии метана:

a, b, v — гильберт-визуализация пламени перед включением поля (a), во время электрического импульса (b), после отключения (v), g — оценка траектории движения фронта пламени под воздействием электрического импульса

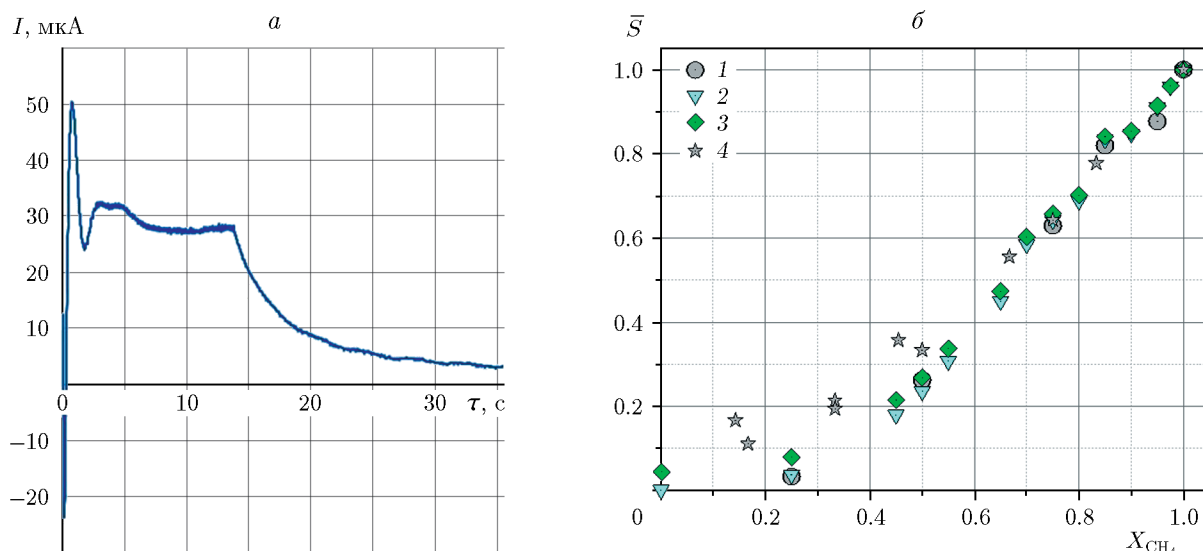


Рис. 3. Ток, протекающий через пламя:

a — форма электрического импульса; b : 1 — нормированная интенсивность свечения CH^* в диффузионном пламени, 2, 3 — функция тока в диффузионном пламени, 4 — в предварительно перемешанном пламени

На рис. 3 показаны форма регистрируемого импульса и значения среднего тока в безразмерном виде (функция электрического тока): $\bar{S} = \frac{I - I_{H_2}}{I_{CH_4} - I_{H_2}}$, где I_{H_2} — среднее значение тока, протекающего при горении чистого водорода, а I_{CH_4} — в случае сгорания чистого метана. С активной нагрузкой источник питания дает прямоугольный импульс. Наличие электродов и области горения вносило реактивную составляющую сопротивления (индуктивную и емкостную). В результате вместо прямых фронтов наблюдались переходные процессы: при включении — колебательные с затуханием, при снятии напряжения — релаксационные. При осреднении исключались области переходных процессов включе-

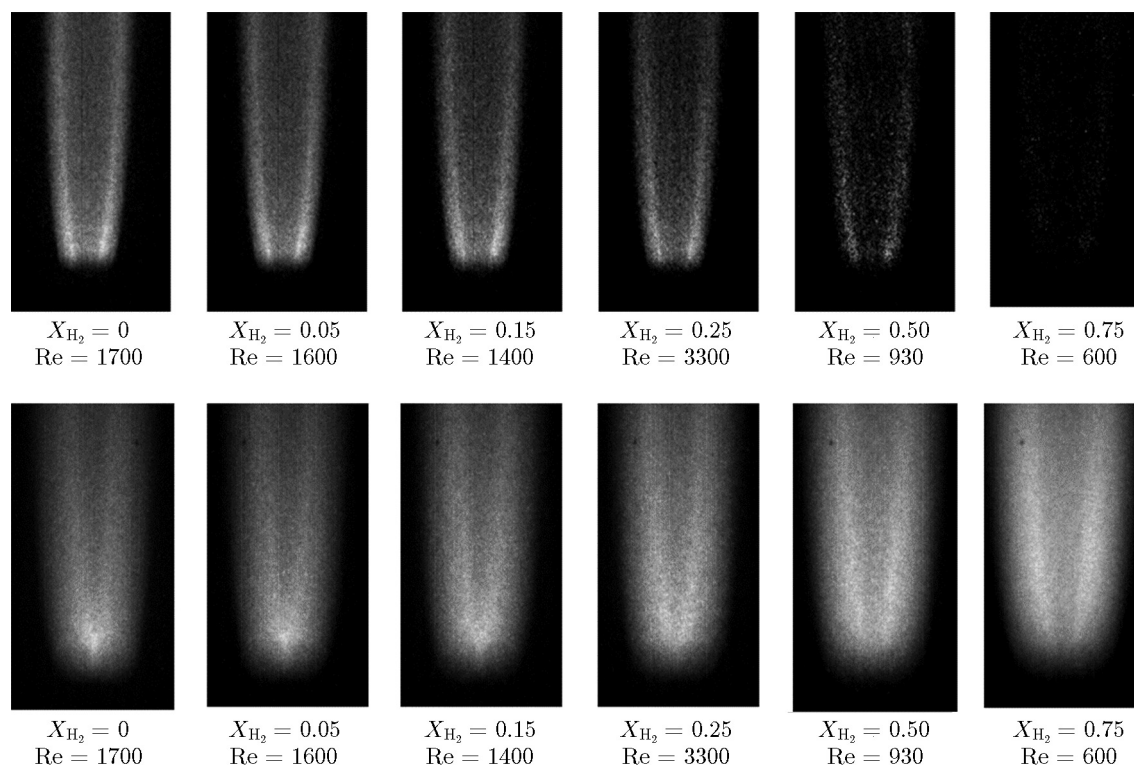


Рис. 4. Хемилюминесценция CH^* в диффузионном пламени:
верхний ряд — CH^* , нижний ряд — OH^*

ния/выключения электрического поля. Из полученных данных следует, что для смесей с молярной долей метана более 40 % ($X_{CH_4} > 0.4$) величина протекающего тока линейно зависит от состава. Это может быть связано с изменением скорости реакции хемоионизации при добавлении водорода. Отметим, что при горении углеводородов концентрация зарядов превышает на 3–4 порядка уровень термической ионизации. Разбавление водородом при молярной доле метана в смеси менее 40 % приводит к тому, что зависимость тока от состава становится нелинейной. Аналогичные измерения в горелке Бунзена в пламени предварительно перемешанного топлива CH_4/H_2 с воздухом выявили наличие такой же картины (4 на рис. 3,б).

При добавлении водорода общий объемный расход сохраняется постоянным, поэтому коэффициент избытка топлива меняется. Во всех рассмотренных режимах добавление водорода увеличивает теплосодержание топливно-воздушной смеси, т. е. температура продуктов сгорания растет.

В [24] установлено, что добавка водорода, наоборот, приводит к увеличению электрического тока в пламени за счет повышения температуры продуктов сгорания. В условиях наших экспериментов этого не наблюдалось ни в одном из экспериментов. При этом граница перехода от линейной зависимости к нелинейной не зависит от скорости реагирующего потока и формы электродов.

При регистрации интенсивности свечения радикалов OH^* и CH^* итоговое изображение создавалось путем суммирования 200 кадров. Из полученного изображения были вычтены фоновые шумы, зарегистрированные фотоприемной матрицей без пламени. Примеры полученных изображений для чистого метана и метана, разбавленного водородом, показаны на рис. 4 и 5. Интенсивность свечения при $X_{H_2} > 0.5$ становится крайне низкой.

Как известно, записываемое изображение представляет собой проекцию осесиммет-

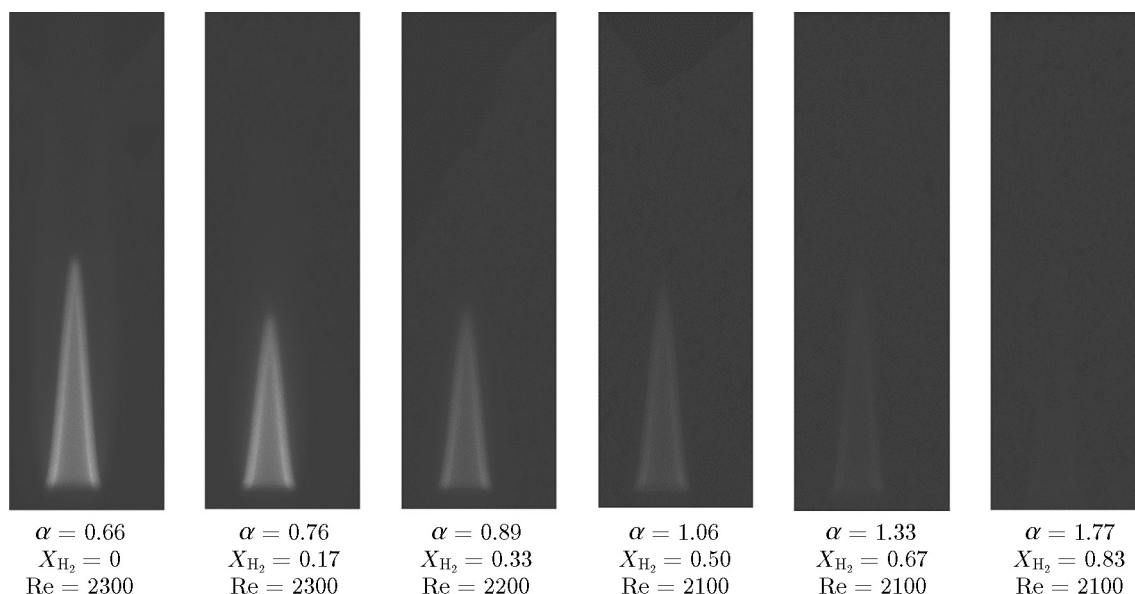


Рис. 5. Хемилюминесценция CH^* в пламени горелки Бунзена

ричного трехмерного объекта на плоскость фотоприемной матрицы. Для анализа интегрального эффекта разбавления метана водородом можно использовать разные подходы. В данной работе рассмотрены

$$A_{OH} = \frac{\left(\int_0^L I_{OH} dy \right)_{X_{CH_4}}}{\left(\int_0^L I_{OH} dy \right)_{X_{CH_4}=1}}, \quad A_{CH} = \frac{\left(\int_0^L I_{CH} dy \right)_{X_{CH_4}}}{\left(\int_0^L I_{CH} dy \right)_{X_{CH_4}=1}}$$

— интегралы интенсивности хемилюминесценции вдоль оси струи,

$$B_{CH} = \frac{\left(\int I_{CH} dS \right)_{X_{CH_4}}}{\left(\int I_{CH} dS \right)_{X_{CH_4}=1}}$$

— интеграл интенсивности хемилюминесценции по всей поверхности изображения S , показанные на рис. 6,а и рис. 7,а соответственно, где x — координата поперек, y — вдоль струи. Величины нормированы на значения, полученные при регистрации пламени чистого метана. Как видно из рис. 6,б, последний метод анализа свечения предпочтительнее, поскольку отражает физически обоснованную закономерность: ожидается, что добавка водорода в топливную смесь приведет к монотонному увеличению светимости OH^* . Для анализа хемилюминесценции CH^* выбор метода оценки интегральных характеристик не столь заметен (рис. 7,б). Важно отметить, что нормированная интегральная зависимость свечения CH^* от состава топливной смеси практически полностью повторяет зависимость безразмерного тока от состава (1 на рис. 3,б).

Влияние разбавления метана водородом на нормированную интенсивность свечения CH^* иллюстрирует рис. 8. Здесь $S_{CH} = B_{CH}$ определялась путем интегрирования по всему изображению. Молярная доля метана взята из расчета его содержания в бинарной топливной смеси с водородом. Как видно из представленных данных, характер зависимости не зависит от типа горелочного устройства. При содержании метана более 40 %

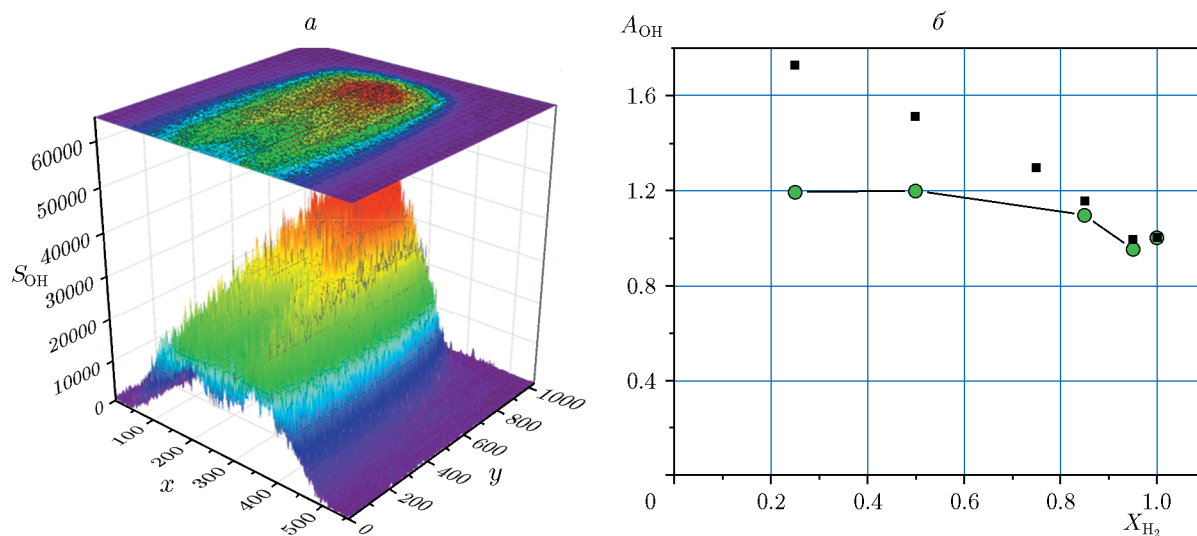


Рис. 6. Хемилюминесценция радикала OH^* в ламинарном диффузионном пламени топливной смеси CH_4/H_2

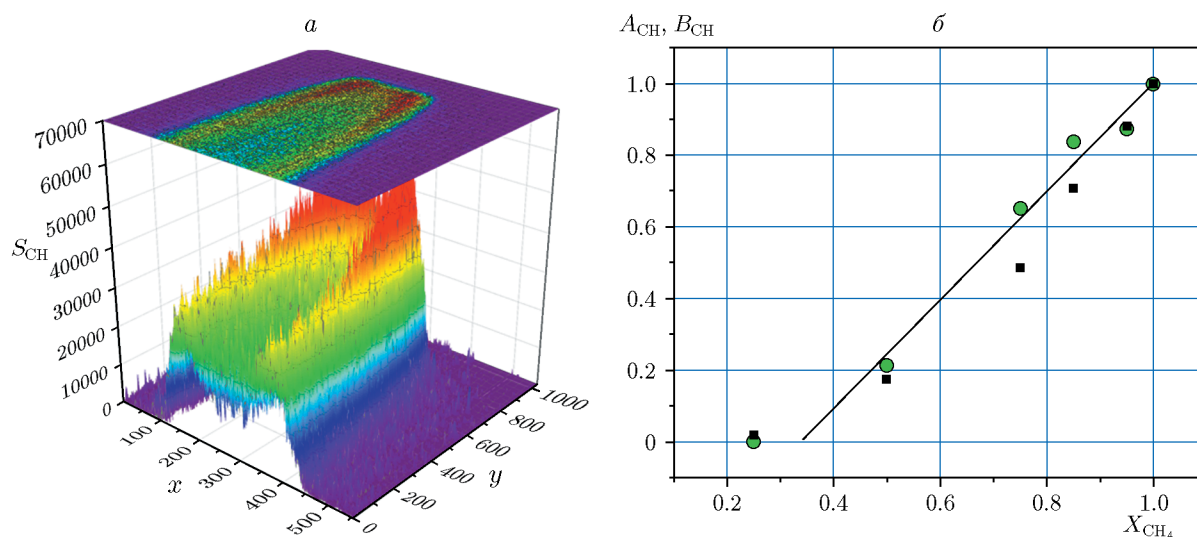


Рис. 7. Хемилюминесценция радикала CH^* в ламинарном диффузионном пламени топливной смеси CH_4/H_2

добавка водорода приводит к линейному уменьшению интенсивности свечения CH^* . Замеченная нами корреляция (см. рис. 8) является инвариантом относительно особенностей газодинамики и процессов переноса тепла и вещества в многокомпонентном реагирующем потоке. Искусственно вносимая электрическим импульсом деформация ламинарного пламени отразилась на данной зависимости.

Известно, что основным источником заряда при горении CH_4/H_2 являются катионы, которые, в свою очередь, являются продуктами реакций CH^* . Добавление водорода в топливную смесь приводит к уменьшению концентрации CH^* в реагирующем потоке, что и определяет соответствующий характер зависимости S_{CH} от состава топливной смеси. Полученные данные о величине электрического тока в пламени CH_4/H_2 позволяют высказать предположение, что снижение скорости образования радикала CH при концентрации

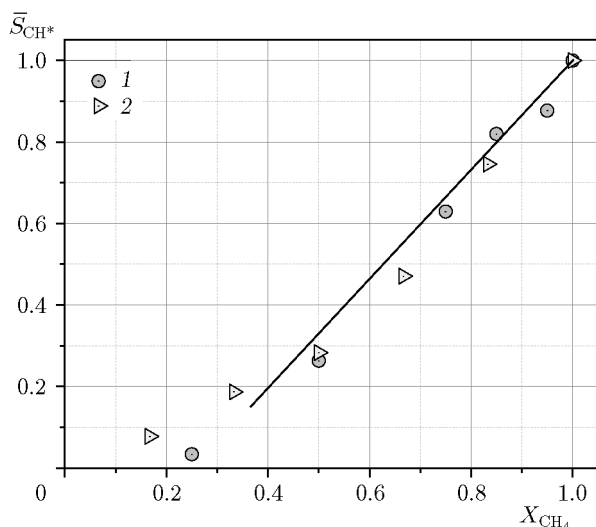


Рис. 8. Хемилюминесценция CH^* в диффузионном пламени CH_4/H_2 (1) и при горении однородной смеси (2)

водорода выше $X_{\text{H}_2} \approx 0.6$ нелинейно зависит от содержания водорода. Это коррелирует с данными [4] о том, что «атака» радикала OH на H_2 происходит гораздо быстрее, чем на CH_4 , особенно когда содержание водорода в топливной смеси превышает объемную долю около 60 %. Заметим, что ламинарная скорость горения и температура пламени нелинейно растут при добавлении водорода [25] во всем диапазоне концентраций водорода в смеси с метаном.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Как показали проведенные нами измерения, при импульсном воздействии электрического поля топливной смеси CH_4/H_2 на пламя величина тока линейно уменьшается по мере разбавления метана водородом. Уменьшение молярной доли метана в топливной смеси до 40 % и менее приводит к тому, что зависимость электрического тока от состава становится нелинейной. При этом граница перехода от линейной зависимости к нелинейной не зависит от скорости потока и формы электрода. Результаты измерений хемилюминесценции радикала CH^* выявили совершенно аналогичную корреляцию интенсивности люминесценции с объемной долей водорода в топливной смеси. Эти закономерности инвариантны к типу пламени и газодинамическим характеристикам реагирующего потока. При горении заранее перемешанной смеси и диффузионном пламени зависимость нормированного тока (и безразмерной интенсивности хемилюминесценции) от состава смеси CH_4/H_2 одна и та же. Полученные данные свидетельствуют о том, что измерения электрического тока в струйном реагирующем течении позволяют получить достоверные данные о влиянии разбавления метана водородом на скорость образования радикала CH .

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 22-19-00803). Оборудование предоставлено в рамках государственного задания Института теплофизики СО РАН.

ЛИТЕРАТУРА

1. Jin U., Kim K. T. Experimental investigation of combustion dynamics and NO_x/CO emissions from densely distributed lean-premixed multinozzle $\text{CH}_4/\text{C}_3\text{H}_8/\text{H}_2/\text{air}$ flames // *Combust. Flame.* — 2021. — V. 229. — 111410. — DOI: 10.1016/j.combustflame.2021.111410.
2. Jin Y., Luo H., Zhang G., Zhai C., Ogata Y., Matsumura Y., Ichikawa T., Nakashimada Y., Kim W., Nishida K. Ignition timing effect on the combustion performance of hydrogen addition in methane fermentation gas in a local energy system // *Fuel.* — 2022. — V. 324, Pt B. — 124714. — DOI: 10.1016/j.fuel.2022.124714.
3. Смыгалина А. Е., Цыплаков А. И., Киверин А. Д., Зайченко В. М. Горение обедненных смесей на основе водорода в двигателе с искровым зажиганием // *Изв. РАН. Энергетика.* — 2018. — № 4. — С. 87–99. — DOI: 10.31857/S000233100002367-7. — EDN: YOVDJB.
4. Francis K. A., Sreenivasan R., Raghavan V. Investigation of structures and reaction zones of methane-hydrogen laminar jet diffusion flames // *Int. J. Hydrogen Energy.* — 2011. — V. 36, N 17. — P. 11183–11194. — DOI: 10.1016/j.ijhydene.2011.06.002.
5. Calcote H. F. Mechanisms for the formation of ions in flames // *Combust. Flame.* — 1957. — V. 1, N 4. — P. 385–403. — DOI: 10.1016/0010-2180(57)90001-9.
6. Goodings J. M., Bohme D. K., Ng C.-W. Detailed ion chemistry in methane-oxygen flames. I. Positive ions // *Combust. Flame.* — 1979. — V. 36. — P. 27–43. — DOI: 10.1016/0010-2180(79)90044-0.
7. Goodings J. M., Bohme D. K., Ng C.-W. Detailed ion chemistry in methane-oxygen flames. II. Negative ions // *Combust. Flame.* — 1979. — V. 36. — P. 45–62. — DOI: 10.1016/0010-2180(79)90045-2.
8. Ulybyshev K. E. Electric structure of the combustion front in a homogeneous methane-air mixture // *Fluid Dynamics.* — 1998. — V. 33. — P. 1–4. — DOI: 10.1007/BF02698153.
9. Старик А. М., Савельев А. М., Титова Н. С. Кинетические процессы в плазме, образующейся при горении углеводородных топлив // *Инж.-физ. журн.* — 2011. — Т. 84, № 1. — С. 93–115. — EDN: NXXWWV.
10. Belhi M., Domingo P., Vervisch P. Modelling of the effect of DC and AC electric fields on the stability of a lifted diffusion methane/air flame // *Combust. Theory Model.* — 2013. — V. 17, N 4. — P. 749–787. — DOI: 10.1080/13647830.2013.802415.
11. Prager J., Riedel U., Warnatz J. Modeling ion chemistry and charged species diffusion in lean methane-oxygen flames // *Proc. Combust. Inst.* — 2007. — V. 31, N 1. — P. 1129–1137. — DOI: 10.1016/j.proci.2006.07.141.
12. Chen B., Wang H., Wang Z., Han J., Alquaity A. B. S., Wang H., Hansen N., Sarathy S. M. Ion chemistry in premixed rich methane flames // *Combust. Flame.* — 2019. — V. 202. — P. 208–218. — DOI: 10.1016/j.combustflame.2019.01.009.
13. Knyazkov D. A., Gerasimov I. E., Bolshova T. A., Kiselev V. G., Shmakov A. G., Paletsky A. A. Cationic structure of premixed near-stoichiometric $\text{CH}_4/\text{O}_2/\text{Ar}$ flames at atmospheric pressure: New insights from mass spectrometry, quantum chemistry, and kinetic modeling // *Combust. Flame.* — 2022. — V. 241. — 112106. — DOI: 10.1016/j.combustflame.2022.112106.
14. Власов П. А., Михайлов Д. И., Панкратьева И. Л., Полянский В. А. Зондовая диагностика хемоионизационных процессов в углеводородных высокотемпературных газовых смесях // *Изв. РАН. МЖГ.* — 2020. — № 6. — С. 17–24. — DOI: 10.31857/S0568528120050151. — EDN: RSFSQX.
15. Garcia A. M., Le Bras S., Prager J., Häring M., Polifke W. Large eddy simulation of the dynamics of lean premixed flames using global reaction mechanisms calibrated for $\text{CH}_4\text{--H}_2$ fuel blends // *Phys. Fluids.* — 2022. — V. 34, N 9. — 095105. — DOI: 10.1063/5.0098898.

16. **Kazakov A., Frenklach M.** Reduced Reaction Sets based on GRI-Mech 1.2. — Berkeley: Univ. of California at Berkeley, 1994. — <http://www.me.berkeley.edu/drm/>.
17. **Altendorfner F., Kuhl J., Zigan L., Leipertz A.** Study of the influence of electric fields on flames using planar LIF and PIV techniques // Proc. Combust. Inst. — 2011. — V. 33, N 2. — P. 3195–3201. — DOI: 10.1016/j.proci.2010.05.112.
18. **Starikovskii A., Skoblin M., Hammer T.** Influence of weak electric fields on flame structure // 46th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Jan. 7–10, 2008, Reno, Nevada. — AIAA 2008–995. — DOI: 10.2514/6.2008-995.
19. **Тупикин А. В., Третьяков П. К., Денисова Н. В., Замашников В. В., Козулин В. С.** Диффузионный факел в электрическом поле с изменяемой пространственной конфигурацией // Физика горения и взрыва. — 2016. — Т. 52, № 2. — С. 49–53. — DOI: 10.15372/FGV20160205. — EDN: VVYHQF.
20. **Escofet-Martin D., Chien Y.-C., Dunn-Rankin D.** PLIF and chemiluminescence in a small laminar coflow methane-air diffusion flame at elevated pressures // Combust. Flame. — 2022. — V. 243. — 112067. — DOI: 10.1016/j.combustflame.2022.112067.
21. **Nori V., Seitzman J.** Evaluation of chemiluminescence as a combustion diagnostic under varying operating conditions // 46th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Jan. 7–10, 2008, Reno, Nevada. — AIAA 2008–953. — DOI: 10.2514/6.2008-953.
22. **Дубнищев Ю. Н., Арбузов В. А., Лукашов В. В., Шаров К. А., Леманов В. В.** Исследование струйного горения водорода с помощью Гильберт-диагностики // Автометрия. — 2019. — Т. 55, № 1. — С. 21–25. — DOI: 10.15372/AUT20190103. — EDN: YWSQLR.
23. **Голубев И. Ф.** Вязкость газов и газовых смесей: справочное руководство. — М.: Физматгиз, 1959.
24. **Ding Y., Durox D., Darabiha N., Schuller T.** Combustion state monitoring of premixed heating appliances with flame ionization current and chemiluminescence // Combust. Sci. Technol. — 2019. — V. 191, N 2. — P. 382–401. — DOI: 10.1080/00102202.2018.1472085.
25. **Hermanns R. T. E.** Laminar burning velocities of methane-hydrogen-air mixtures: PhD Thesis / Technische Univ. Eindhoven. — Eindhoven, 2007. — DOI: 10.6100/IR630126.

Поступила в редакцию 08.11.2023.

После доработки 19.01.2024.

Принята к публикации 07.02.2024.
