

**Изучение пределов устойчивого горения
диффузионного пламени микроструи водорода,
истекающей из круглого микросопла, при введении в водород
или воздух инертных и реагирующих газов**

А. Г. Шмаков^{1,2}, В. В. Козлов^{2,3}, М. В. Литвиненко^{2,3}, Ю. А. Литвиненко³

¹ *Институт химической кинетики и горения им. В. В. Воеводского СО РАН
Новосибирск, Россия*

² *Новосибирский государственный университет
Новосибирск, Россия*

³ *Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН
Новосибирск, Россия*

Аннотация

Экспериментально изучено влияние добавок инертных (He, N₂, Ar, CO₂) и реагирующих (CH₄, O₂, CF₃Br, (CH₃O)₃PO) газов в поток водорода или в окружающий воздух на условия отрыва диффузионного пламени микроструи водорода, истекающей из круглого микросопла. С помощью теневого метода измерена критическая скорость потока водорода, при которой происходит отрыв пламени микроструи водорода от сопла при введении исследуемых газов как в воздух, так и в водород. Установлено, что добавка всех исследуемых газов в поток водорода приводит к уменьшению диапазона скорости микроструи, при которой возможна стабилизация пламени, вне зависимости от того, являются вводимые в водород газы инертными или реагирующими. Показано, что в случае добавки исследуемых газов в поток водорода основным фактором, определяющим критическую скорость отрыва пламени от микросопла, является средний молекулярный вес газовой смеси H₂ с добавками. В случае введения исследуемых газов в окружающий диффузионное пламя воздух критическая скорость отрыва определяется их способностью воздействовать на химические реакции окисления водорода (ингибирующей способностью), а также снижением концентрации кислорода за счет разбавления воздуха вводимой добавкой. Полученные данные представляют интерес для водородной энергетики с точки зрения определения пределов устойчивого горения микроструи водорода, а также определения минимальных флегматизирующих концентраций добавок ингибиторов и пламегасителей в воздухе, предотвращающих воспламенение и горение водорода при его утечке в случае нештатной ситуации.

Ключевые слова

микроструя водорода, отрыв пламени, спутный поток воздуха, круглое микросопло, ингибитор горения, флегматизатор

Источник финансирования

Работа поддержана грантом РФФИ № 16-19-10330

Для цитирования

Шмаков А. Г., Козлов В. В., Литвиненко М. В., Литвиненко Ю. А. Изучение пределов устойчивого горения диффузионного пламени микроструи водорода, истекающей из круглого микросопла, при введении в водород или воздух инертных и реагирующих газов // Сибирский физический журнал. 2019. Т. 14, № 3. С. 64–75. DOI 10.25205/2541-9447-2019-14-3-64-75

Study of Stable Combustion Ranges of Diffusion Flame Microjet of Hydrogen Effluent from around Micronozzle at Addition of Inert and Reactive Gases into Hydrogen or Air

A. G. Shmakov^{1,2}, V. V. Kozlov^{2,3}, M. V. Litvinenko^{2,3}, Yu. A. Litvinenko³

¹ Voevodsky Institute of Chemical Kinetics and Combustion SB RAS
Novosibirsk, Russian Federation

² Novosibirsk State University
Novosibirsk, Russian Federation

³ Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS
Novosibirsk, Russian Federation

Abstract

The effect addition of inert (He, N₂, Ar, CO₂) and reacting (CH₄, O₂, CF₃Br, (CH₃O)₃PO) gases in a hydrogen or in coflowing air stream on lift-off diffusion flame conditions of hydrogen micro jet effluxed from the round micro nozzle was experimentally studied. Using the schlieren technique a critical hydrogen flow rate was established at which the flame of the hydrogen microjet detaches from the nozzle when introducing additives of the studied gases into both air and hydrogen. It has been established that the addition of all the studied gases to the hydrogen leads to a decrease in the velocity range of its microjet at which flame stabilization is possible, regardless of whether the gases introduced into hydrogen are inert or reactive. It is shown that in the case of the addition of various gases to the hydrogen, the main factor determining the critical flow rate at flame lift-off from the micro nozzle is the average molecular weight of the H₂ gas mixture with additives. At addition of the studied gases into the coflowing air, the critical flow rate of H₂ is determined by their affect on the chemical reactions of hydrogen oxidation (inhibition effectiveness), as well as by a decrease in oxygen concentration due to dilution of air by additives. The data obtained are of interest to hydrogen energy in terms of determining the limits of sustainable combustion of the hydrogen microjet, as well as determining the minimum phlegmatizing concentrations of additives of inhibitors and fire suppressant in the air, preventing the ignition and explosion of hydrogen in case of emergency at its leak.

Keywords

hydrogen microjet, flame detachment, coflow air stream, round micronozzle, fire retardant, phlegmatizer

Funding

This work was supported by the Russian Science Foundation, project number 16-19-10330

For citation

Shmakov A. G., Kozlov V. V., Litvinenko M. V., Litvinenko Yu. A. Study of Stable Combustion Ranges of Diffusion Flame Microjet of Hydrogen Effluent from around Micronozzle at Addition of Inert and Reactive Gases into Hydrogen or Air. *Siberian Journal of Physics*, 2019, vol. 14, no. 3, p. 64–75. (in Russ.) DOI 10.25205/2541-9447-2019-14-3-64-75

Введение

Микрогорелочные устройства находят широкое применение в сфере производства тепла, электроэнергии, освещения, получения различных веществ и материалов. Такие устройства по сравнению с крупномасштабными горелочными установками более безопасны, а также позволяют легко управлять режимами их работы. Кроме того, путем изменения числа микрогорелок в устройстве можно легко масштабировать процесс в целом.

Водород является экологически чистым топливом, обладающим широкими концентрационными пределами горения в смеси с воздухом, поэтому устройства с микрогорелками на водороде перспективны для практического использования. При изучении диффузионного горения высокоскоростной микроструи водорода, истекающей в неподвижный воздух, было установлено, что при характерных размерах круглых и плоских сопел от 0,1 до 3 мм пламя имеет двухзонную структуру, горение в этих последовательных зонах может происходить независимо друг от друга [1–3]. Однако существование первой зоны, представляющей собой присоединенное ламинарное диффузионное пламя, обеспечивает стабилизацию горения вплоть до звуковых скоростей истечения потока водорода. В связи с этим важно изучить за-

кономерности процесса стабилизации пламени на микрогорелке, обусловленные влиянием добавки исследуемых газов как в микрострую топлива, так и в окружающий ее воздух. Такие исследования позволяют найти режимы устойчивого горения пламени, что дает ключ к управлению подобными процессами. Например, ранее было предложено использовать добавку метана в водород для управления режимом горения микроструи и предотвращения перегрева и разрушения микросопла. В работе [4] путем численного моделирования было рассчитано температурное поле в пламени микроструи водорода, истекающего со скоростью 1–2 м/с из металлического сопла с внутренним диаметром 0,8 мм и толщиной стенок 0,2 мм. На основе полученных расчетных данных проведен анализ влияния состава горючей смеси на температурный режим микросопла. Кроме того, результаты расчетов показали, что структура пламени имеет близкую к сферической форму, в нижней части пламени наблюдается «ведущая кромка», характерная для так называемого «тройного пламени». Стабилизация пламени на сопле в этих условиях обусловлена тепловым потоком из зоны ведущей кромки пламени в боковую поверхность сопла.

В работе [5] с помощью спектроскопических методов была экспериментально изучена тепловая и химическая структура диффузионного пламени водорода при истечении его потока в воздух из круглых металлических сопел диаметром 0,2 и 0,48 мм с скоростью 16,48 и 7,16 м/с соответственно. Полученные данные были сопоставлены с результатами численного расчета с использованием детального химико-кинетического механизма окисления водорода. Сопоставление показало, что в области среза сопла модель не предсказывает подмешивание окружающего воздуха в поток водорода, наблюдаемое в эксперименте, поэтому требуется дальнейшая доработка модели как в плане кинетики реакций, так и в отношении уточнения параметров молекулярного переноса веществ. Эта работа показывает, что, несмотря на большой прогресс в области численного моделирования, пока не все особенности структуры диффузионного пламени водорода удается адекватно описать путем проведения компьютерных расчетов.

В работе [6] экспериментально с помощью оптической спектроскопии изучена структура пламени водорода (профили температуры и концентрации веществ) при истечении его в воздух из круглого металлического сопла с внутренним диаметром 1 мм и толщиной стенки 0,17 мм при скорости потока 36 и 3,3 м/с. Численные расчеты структуры пламени с использованием 5 различных детальных химико-кинетических механизмов окисления водорода показали удовлетворительное согласие с результатами измерений. Таким образом, было показано, что при определенных условиях (большой диаметр сопла, высокая скорость потока водорода) результаты численного моделирования структуры пламени слабо чувствительны к выбору кинетической схемы реакции окисления водорода, и на этот факт нужно обратить особое внимание, так как это довольно неожиданно.

Ранее нами было исследовано влияние добавок кислорода, метана, гелия, азота в водород на условия отрыва диффузионного пламени, стабилизированного на круглом металлическом микросопле [7–9]. Как было установлено, добавка этих газов в водород приводит к уменьшению скорости потока горючего, при котором происходит отрыв пламени. Систематические исследования влияния добавок других газов в поток топлива или в окружающий воздух при горении микроструи водорода в настоящее время в литературе отсутствуют.

Одной из важных проблем для водородной энергетики является пожаро- и взрывобезопасность, так как сжатый водород при хранении и транспортировке представляет серьезную опасность, заключающуюся в воспламенении и горении водорода при его утечке в случае нештатной ситуации. Поэтому нахождение способов тушения пожаров и предотвращения взрывов в случае микроутечек водорода также является актуальной научной задачей.

Задачей данной работы является получение новых экспериментальных данных по влиянию добавок различных инертных и реагирующих газов в водород или в окружающий воздух на пределы горения (условия отрыва пламени от микросопла) высокоскоростной струи

газообразного топлива, истекающего из круглого микросопла, а также обобщение этих данных с ранее полученными результатами для выявления общих закономерностей.

Экспериментальная часть

Пламя стабилизировали на круглом цилиндрическом микросопле, представляющем собой трубку из нержавеющей стали внутренним диаметром $0,5 \pm 0,01$ мм, толщиной стенки $0,1 \pm 0,01$ мм и длиной 30 мм. Нижний конец этой стальной трубки был соединен с медной трубкой диаметром 3 мм. Медная трубка имеет электрический нагреватель для нагрева потока водорода до $90\text{--}100$ °С. Для создания спутного потока воздуха, обдувающего микросопло, была использована труба из нержавеющей стали диаметром 70 мм, имеющая на конце сужение до диаметра 44 мм. Для предотвращения конденсации паров добавки триметилфосфата труба имеет двойные стенки, между которыми прокачивается с вода с температурой 86 °С. Внутри трубы на расстоянии 100 и 150 мм от ее выходного среза расположены две диафрагмы из пористого материала для выравнивания скорости потока воздуха по сечению трубы. Схема горелки приведена на рис. 1.

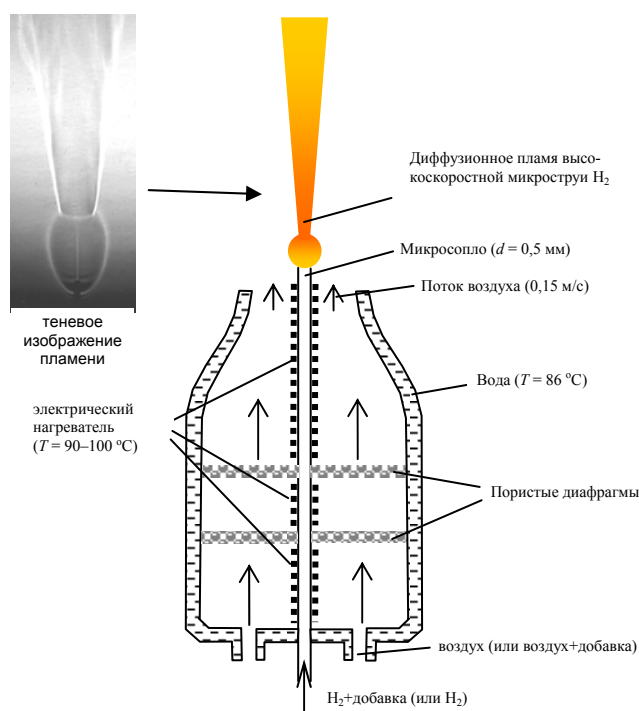


Рис. 1. Схема горелки с цилиндрическим микросоплом для измерения скорости отрыва пламени высокоскоростной микроструи H_2 при введении в нее (или в спутный поток воздуха) добавок различных газов

Fig. 1. Sketch of the microburner for measuring the speed of the hydrogen microjet separating from the nozzle upon injection of gas additives to the microjet and ambient air

Ингибиторы горения CF_3Br (фреон 13B1, $T_{кип} = -58$ °С), триметилфосфат (далее – ТМФ, $(CH_3O)_3PO$, $T_{кип} = 197$ °С), инертные вещества (He , N_2 , Ar , CO_2) вводились либо в поток H_2 либо в поток воздуха. Реагирующие газы (O_2 или CH_4) вводились только в поток H_2 . Смешивание

вание газов происходило непосредственно в линии подачи газовой смеси в горелку (трубки диаметром 6 мм), расстояние от места смешивания до горелки составляло около 1,5 м. Концентрация CF_3Br , He, N_2 , Ar, CO_2 , CH_4 , O_2 в смеси с H_2 или с воздухом задавалась с помощью регуляторов массового расхода газов (MSK Instruments, USA), в которые эти компоненты подавались из баллонов с редукторами. Относительная погрешность задания концентрации газообразных добавок в смеси составляет $\pm 1\%$.

Для введения паров ТМФ в поток H_2 (или в поток воздуха) использовался испаритель, представляющий собой цилиндрический сосуд из термостойкого стекла (диаметр 25 мм, длина 100 мм) с двумя патрубками для ввода и вывода газов и одним патрубком для ввода жидкого ТМФ. Испаритель заполнен стальными шариками (диаметром 3 мм) для увеличения поверхности испарения жидкости. Через один из патрубков в испаритель подается поток газа-носителя (H_2 или воздух), а из другого выходит смесь паров ТМФ с газом-носителем. Испаритель нагревается до 200–220 °С с помощью электрического нагревателя, расположенного вокруг испарителя. Поток жидкого ТМФ, подаваемого в испаритель через тонкую металлическую трубку внутренним диаметром 1 мм, задавался с помощью шприца, поршень которого приводится в движение шаговым двигателем. Относительная погрешность задания концентрации паров ТМФ в смеси составляет $\pm 2\%$. Для предотвращения конденсации паров ТМФ в линии подачи газов, трубки от испарителя до горелки нагревались с помощью отдельного электрического нагревателя до 90 °С.

Для измерения скорости отрыва пламени устанавливали некоторый расход H_2 через микросопло. После этого поджигали пламя и постепенно увеличивали концентрацию вводимой в водород (или в воздух) добавки исследуемых газов до достижения момента полного погасания пламени (т. е. момента отрыва пламени). Факт отрыва пламени от микросопла фиксировали теневым методом. Скорость потока микроструи в момент отрыва пламени оценивали исходя из объемного расхода газовой смеси через сопло и площади его сечения. Каждое измерение проводили не менее трех раз. После этого изменяли расход H_2 , и всю процедуру повторяли. Объемный расход спутного потока воздуха был постоянным, при этом скорость потока воздуха на срезе сопла составляла 0,15 м/с. При такой относительно низкой (относительно скорости истечения микроструи водорода) величине скорости потока воздуха условия эксперимента можно считать эквивалентными горению микроструи H_2 в неподвижном воздухе.

Результаты и обсуждение

На рис. 2 представлена измеренная в эксперименте зависимость объемной концентрации добавок CF_3Br , ТМФ, He, N_2 , Ar, CO_2 , CH_4 , O_2 от скорости микроструи смеси H_2 + добавка в момент отрыва пламени. Как можно видеть из этого рисунка, введение добавок любых из исследованных газов в поток H_2 приводит к уменьшению скорости потока, при котором происходит отрыв пламени от среза микросопла.

Приведенные на рис. 2 данные позволяют расположить исследованные вещества в порядке величины их эффекта (величины концентрации добавки, при которой происходит отрыв пламени при фиксированной скорости потока истекающей из микросопла смеси) на условия отрыва пламени следующим образом:

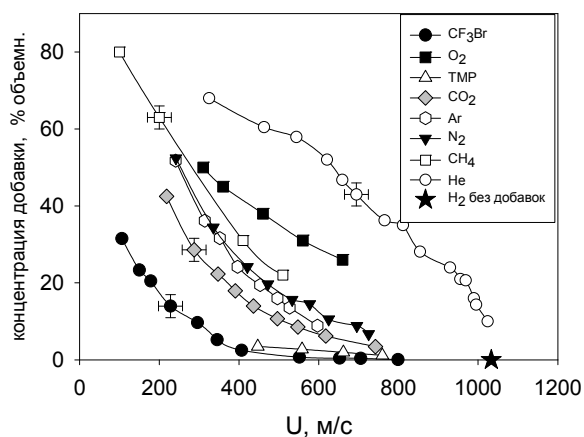


Если предположить, что эффективность добавок зависит от их молекулярной массы, то для исследованных веществ этот ряд можно представить следующим образом:

$$4 < \mathbf{32} < 16 < 28 < 40 < 44 < 140 < 149.$$

Рис. 2. Зависимость объемной концентрации добавок CF_3Br , ТМФ, He, N_2 , Ar, CO_2 , CH_4 , O_2 в смеси с H_2 от скорости микроструи этой смеси (U) в момент отрыва пламени от среза сопла

Fig. 2. Bulk concentration of CF_3Br , ТМФ, He, N_2 , Ar, CO_2 , CH_4 and O_2 in the mixture with hydrogen versus microjet velocity at the moment of flame separation from the nozzle



Как видно, исключением для представленной закономерности является только O_2 . По всей видимости, O_2 , в отличие от всех других исследованных добавок, является окислителем, и это может способствовать дополнительной стабилизации пламени. По этой причине O_2 немного отклоняется от общей закономерности соответствия эффективности молекулярной массе добавки. Также обращает на себя внимание то, что для He характер зависимости качественно отличается от всех других кривых, особенно при высокой скорости потока смеси $\text{H}_2 + \text{добавка}$. Видно, что при небольших концентрациях добавки He (10–20 %) он слабо уменьшает скорость отрыва пламени по сравнению с величиной, измеренной для чистого H_2 , составляющей 1033 ± 20 м/с. Малое увеличение концентрации добавки ТМФ и CF_3Br при высокой скорости потока смеси $\text{H}_2 + \text{добавка}$ приводит к очень сильному уменьшению величины скорости отрыва пламени. Из литературы известно, что ТМФ и CF_3Br являются эффективными ингибиторами горения, влияющими на химию и кинетику процессов окисления различных видов топлива [10–12]. Поэтому представляет интерес, насколько существенным может быть вклад физических и химических процессов в эффект снижения скорости отрыва пламени при введении ТМФ и CF_3Br . В упрощенном случае условия отрыва диффузионного пламени могут рассматриваться в терминах так называемого «ведущего края тройного пламени». Для этой конфигурации диффузионного пламени градиенты концентрации и скорости вблизи среза микросопла оказывают влияние на распространение пламени вдоль линии максимальной скорости горения, что непосредственно связано с условиями отрыва пламени. Структура и скорость распространения тройного пламени в системе « H_2 – воздух» ранее исследовалась прямым численным моделированием (2D) с использованием детальных химико-кинетических механизмов окисления [13; 14]. Результаты такого моделирования качественно согласуются с выводами упрощенного подхода для рассмотрения условий отрыва пламени.

Таким образом, условия отрыва диффузионного пламени от сопла определяются локальной скоростью газа вблизи его среза и условиями смешения горючего с окислителем на границе их потоков. Поэтому одной из определяющих характеристик условий отрыва пламени является кинетическая энергия истекающего из сопла газового потока, передаваемая вовлекаемому в область горения окружающему воздуху. Очевидно, что чем выше кинетическая энергия микроструи смеси $\text{H}_2 + \text{добавка}$, тем выше локальная скорость газовой смеси в области ведущего края тройного пламени, а условия ближе к критическим условиям отрыва пламени. Кинетическая энергия газового потока пропорциональна $M_r \cdot U^2$, где M_r – средняя молекулярная масса газовой смеси, U – скорость газовой смеси на выходе из сопла. Таким образом, можно предположить, что в случае существования связи между скоростью потока и его молекулярной массой должно выполняться соотношение $U \sim 1/M_r^{0.5}$. На рис. 3 представлена зависимость параметра $1/M_r^{0.5}$ от U для смесей $\text{H}_2 + \text{добавка}$ при отрыве пламени

от сопла. Как можно видеть, представленные в этих координатах зависимости $1/M_r^{0.5}$ от U имеют практически линейный характер, а данные для CO_2 , N_2 и Ar совпадают между собой в пределах ошибки эксперимента. Также видно, что наклон кривых для O_2 , He , CH_4 заметно отличается от наклона кривых для CO_2 , N_2 и Ar . Зависимость для CF_3Br имеет сложный характер – при высоких концентрациях его добавки она совпадает с результатами для CO_2 , N_2 и Ar , а при более низких концентрациях ($< 10\%$) наблюдается расхождение. Важно отметить, что для ТМФ значения параметра $1/M_r^{0.5}$ в диапазоне скоростей потока смеси H_2 + добавка 450–760 м/с с хорошей точностью также совпадают с данными для CO_2 , N_2 и Ar . Так как CO_2 , N_2 и Ar являются химически инертными добавками и действуют на условия отрыва пламени в основном за счет эффекта разбавления и изменения теплофизических параметров горючей смеси, то подобное совпадение данных для ТМФ с данными для CO_2 , N_2 и Ar может трактоваться как отсутствие химического эффекта добавки ТМФ на процесс горения H_2 . С другой стороны, H_2 является основным компонентом горючей смеси и имеет значительно более высокие значения коэффициента диффузии, чем большинство исследованных в данной работе добавок. Поэтому можно предположить, что концентрация добавок с большой молекулярной массой в области ведущего края тройного пламени достаточно мала из-за их низкого коэффициента диффузии, чтобы оказать заметное влияние на условия отрыва пламени. Тем не менее, эти добавки имеют большой молекулярный вес, поэтому даже при их низких концентрациях смеси ее средний молекулярный вес значительно изменяется по сравнению с чистым H_2 . В данной работе для анализа полученных результатов использован достаточно упрощенный подход, поэтому для детального установления причин, по которым зависимость параметра $1/M_r^{0.5}$ от U для CF_3Br , He , O_2 , CH_4 заметно отличаются от результатов для CO_2 , N_2 и Ar , в дальнейшем необходим более глубокий анализ на основе сопоставления экспериментальных результатов и данных численного моделирования параметров пламени H_2 .

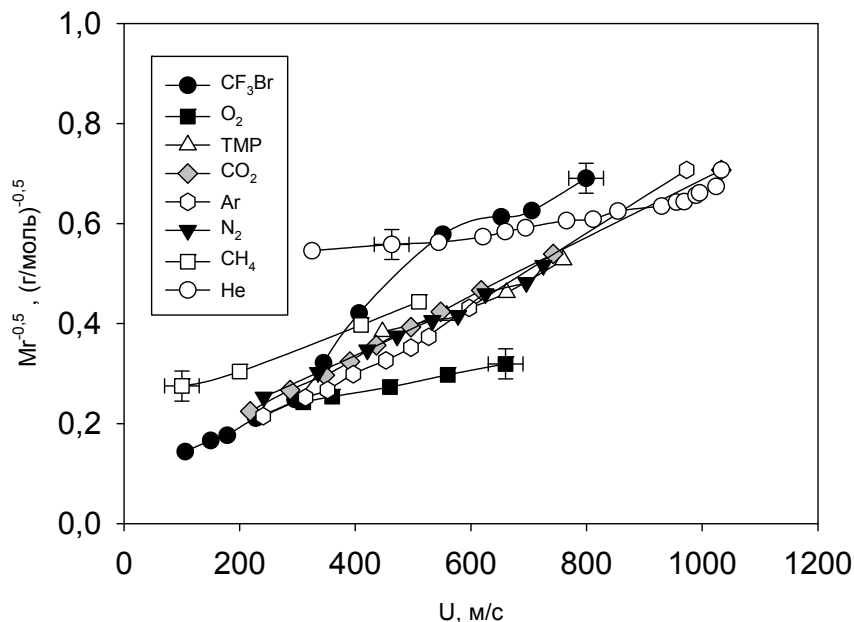


Рис. 3. Зависимость параметра $1/M_r^{0.5}$ в смесях H_2 с различной концентрацией добавок от скорости микроструи этих смесей (U) в момент отрыва пламени от сопла

Fig. 3. Variation of $1/M_r^{0.5}$ at different concentration of the additives versus microjet velocity at the moment of flame separation from the nozzle

На рис. 4 приведены результаты измерения скорости отрыва пламени H_2 от сопла при введении добавок исследуемых газов в поток спутного воздуха. Полученные зависимости скорости потока H_2 в момент отрыва пламени от микросопла имеют практически линейную зависимость от концентрации добавки. Это возможно в том случае, если эффект добавок связан с разбавлением воздуха добавкой, а следовательно, с уменьшением концентрации O_2 в спутном потоке.

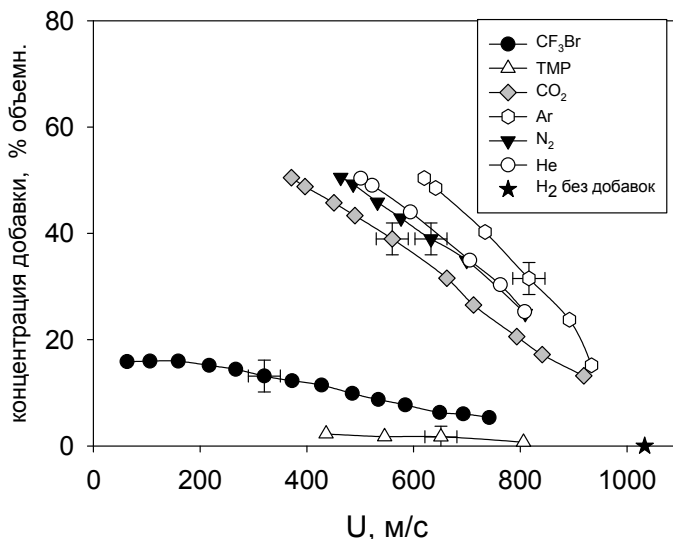


Рис. 4. Зависимость объемной концентрации добавок CF_3Br , ТМФ, He, N_2 , Ar, CO_2 в смеси с воздухом от скорости микроструи H_2 (U) в момент отрыва пламени

Fig. 4. Bulk concentration of CF_3Br , ТМФ, He, N_2 , Ar, and CO_2 mixed with air vs velocity of the hydrogen microjet at the moment of flame separation

Исследуемые газы по величине эффекта на скорость отрыва пламени микроструи H_2 можно ранжировать в следующем порядке:

$$Ar < He < N_2 < CO_2 < CF_3Br < ТМФ.$$

Как можно видеть, в этом ряду не просматривается явной тенденции влияния молекулярного веса добавки. Также нет явной зависимости от удельной молярной теплоемкости, вязкости и коэффициента диффузии исследованных газов. Наименьший эффект на критическую скорость потока в момент отрыва пламени от сопла имеет добавка Ar. Кривые для He, N_2 лежат достаточно близко друг к другу. Добавка CO_2 несколько более сильно влияет на отрыв пламени по сравнению с добавками He и N_2 . Более высокую эффективность по сравнению с инертными газами имеют добавки CF_3Br и ТМФ. Для одинакового снижения скорости потока H_2 в момент отрыва пламени требуется ввести их в смесь в 10 раз более низкой концентрации, чем инертные газы.

Если экстраполировать полученные зависимости для N_2 и CO_2 к оси ординат, то можно видеть, что гашение пламени микроструи водорода при низких значениях скорости потока происходит при концентрации этих добавок около 60–80 % объема. Согласно литературным данным, минимальная взрывоопасная концентрация кислорода (МВСК) при его разбавлении N_2 , при которой возможно воспламенение водорода, составляет 5 % [15]. Этой величине соответствует смесь воздуха и азота в пропорции 1 : 3, т. е. концентрация добавки N_2 в воздухе составляет 75 %. Для CO_2 , согласно данным [15], горение смесей водорода прекращается при

концентрации CO_2 выше 62 % в смеси с O_2 . Как можно видеть, для N_2 и CO_2 данные величины коррелируют с представленными на рис. 4 данными.

В случае добавок CF_3Br и ТМФ существенный вклад в их эффективность дает способность этих веществ ингибировать процесс горения, т. е. замедлять химический процесс окисления топлива. Из литературы известно, что эффективность действия добавки ТМФ на диффузионное пламя, в случае его введения со стороны окислителя, заметно выше, чем эффект добавки CF_3Br [16; 17]. Представленные на рис. 4 результаты подтверждают этот факт, в то время как, согласно приведенным на рис. 2 и 3 данным, эти же соединения при введении в поток H_2 оказывают в основном физическое воздействие на пламя (за счет увеличения плотности (средней молекулярной массы) горючей смеси).

Если сравнить эффект одних и тех же добавок при их введении в поток водорода или воздуха, то можно видеть, что наиболее сильное влияние (определенное по объемной концентрации этих добавок в смеси) наблюдается в случае введения этих вещества в водород. Например, для CF_3Br отрыв пламени происходит при скорости потока горючей смеси 500 и 300 м/с при введении 10 % этой добавки в поток воздуха или в H_2 соответственно, т. е. скорости потоков отличаются почти в 1,7 раза.

Для N_2 отрыв пламени происходит при скорости 800 и 400 м/с при введении 25 % этой добавки в поток воздуха или в H_2 соответственно, что дает отличие в скорости потоков в 2 раза.

Заключение

В работе экспериментально изучено влияние газообразных добавок – CF_3Br , ТМФ ($((\text{CH}_3\text{O})_3\text{PO})$), He, N_2 , Ar, CO_2 , CH_4 , O_2 на условия отрыва пламени высокоскоростной микроструи H_2 , истекающей из круглого микросопла в воздух. Показано, что в случае добавления исследованных газов в поток H_2 условия отрыва пламени определяются физическими параметрами топливной смеси, а именно ее средним молекулярным весом (или плотностью). Эффект добавок химически активных ингибиторов горения (CF_3Br и ТМФ) и реагирующих газов (CH_4 и O_2) в поток H_2 также обусловлен изменением среднего молекулярного веса топливной смеси в результате добавки исследуемых газов.

В случае добавления исследованных газов в воздух их эффект на условия отрыва пламени высокоскоростной микроструи H_2 , большей частью обусловлен снижением концентрации O_2 из-за разбавления воздуха добавкой. В случае добавления CF_3Br и ТМФ, помимо эффекта разбавления, существенное влияние на условия отрыва пламени оказывает способность этих веществ замедлять цепные процессы окисления H_2 . Для детального анализа особенностей влияния изученных газов на критические параметры устойчивого горения высокоскоростной микроструи H_2 в дальнейшем необходимо проведение численного моделирования тепловой и химической структуры пламени.

Список литературы

1. **Kozlov V. V., Grek G. R., Korobeinichev O. P., Litvinenko Yu. A., Shmakov A. G.** Features of diffusion combustion of hydrogen in the round and plane high-speed microjets (part II). *International Journal of Hydrogen Energy*, 2016, vol. 41, iss. 44, p. 20240–20249.
2. **Kozlov V. V., Vikhorev V. V., Grek G. R., Litvinenko Y. A., Shmakov A. G.** Diffusion Combustion of a Hydrogen Microjet at Variations of its Velocity Profile and Orientation of the Nozzle in the Field of Gravitation. *Combustion Science and Technology*, 2019, vol. 191, iss. 7, p. 1219–1235.
3. **Kozlov V. V., Grek G. R., Kozlov G. V., Litvinenko Yu. A., Shmakov A. G.** Experimental study on diffusion combustion of high-speed hydrogen round microjets. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2019, vol. 44, p. 457–468.

4. **Gao J., Hossain A., Nakamura Y.** Flame base structures of micro-jet hydrogen / methane diffusion flames. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2017, vol. 36, p. 4209–4216.
5. **Cheng T. S., Chao Y.-C., Wu C.-Y., Li Y.-H., Nakamura Y., Lee K.-Y., Yuan T., Leu T. S.** Experimental and numerical investigation of microscale hydrogen diffusion flames. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2005, vol. 30, p. 2489–2497.
6. **Cheng T. S., Wu C. Y., Chen C. P., Li Y.-H., Chao Y.-C., Yuan T., Leu T. S.** Detailed measurement and assessment of laminar hydrogen jet diffusion flames. *Combustion and Flame*, 2006, vol. 146, iss. 1–2, p. 268–282.
7. **Шмаков А. Г., Грек Г. Р., Козлов В. В., Литвиненко Ю. А., Коробейничев О. П.** Диффузионное горение круглой микроструи смесей водорода с метаном, гелием и азотом // Вестник Новосиб. гос. ун-та. Серия: Физика. 2016. Т. 11, № 2. С. 56–76.
8. **Вихорев В. В., Грек Г. Р., Козлов В. В., Литвиненко Ю. А., Литвиненко М. В., Шмаков А. Г.** Горение круглой микроструи смеси водорода с кислородом, истекающей из криволинейного микросопла // Сибирский физический журнал. 2018. Т. 13, № 1. С. 68–79.
9. **Шмаков А. Г., Вихорев В. В., Грек Г. Р., Козлов В. В., Козлов Г. В., Литвиненко Ю. А.** Горение круглой микроструи смеси водорода с кислородом, истекающей из прямолинейного микросопла // Сибирский физический журнал. 2018. Т. 13, № 1. С. 54–67.
10. **Jayaweera T. M., Melius C. F., Pitz W. J., Westbrook C. K., Korobeinichev O. P., Shvartsberg V. M., Shmakov A. G., Rybitskaya I. V., Curran H. J.** Flame Inhibition by Phosphorus-Containing Compounds over a Range of Equivalence Ratios. *Combustion and Flame*, 2005, vol. 140, p. 103–115.
11. **Babushok V., Noto T., Burgess D. R., Hamins A., Tsang W.** Influence of CF_3I , CF_3Br , and CF_3H on High-Temperature Combustion of Methane. *Combustion and Flame*, 1996, vol. 107, p. 351–367.
12. **Noto T., Babushok V. V., Hamins A., Tsang W.** Inhibition Effectiveness of Halogenated Compounds. *Combustion and Flame*, 1998, vol. 112, p. 147–160.
13. **Im H. G., Chen J. H.** Structure and propagation of triple flames in partially premixed hydrogen-air mixtures. *Combustion and Flame*, 1999, vol. 119, p. 436–454.
14. **Im H. G., Chen J. H.** Effect of flow strain on triple flame propagation. *Combustion and Flame*, 2001, vol. 126, p. 1384–1392.
15. **Баратов А. Н., Корольченко А. Я., Кравчук Г. Н. и др.** Пожаровзрывоопасность веществ и материалов и средства их тушения. Справ. изд.: В 2 кн. М: Химия, 1990. Кн. 2. 384 с.
16. **MacDonald M. A., Jayaweera T. M., Fisher E. M., Gouldin F. C.** Variation of Chemically Active and Inert Flame-Suppression Effectiveness with Stoichiometric Mixture Fraction. *27th Symposium (International) on Combustion*, 1998, vol. 27, p. 2749–2756.
17. **MacDonald M. A., Jayawera T. M., Fisher E. M., Gouldin F. C.** Inhibition of Non-Premixed Flames by Phosphorus-Containing Compounds. *Combustion and Flame*, 1999, vol. 116, p. 166–176.

References

1. **Kozlov V. V., Grek G. R., Korobeinichev O. P., Litvinenko Yu. A., Shmakov A. G.** Features of diffusion combustion of hydrogen in the round and plane high-speed microjets (part II). *International Journal of Hydrogen Energy*, 2016, vol. 41, iss. 44, p. 20240–20249.
2. **Kozlov V. V., Vikhorev V. V., Grek G. R., Litvinenko Y. A., Shmakov A. G.** Diffusion Combustion of a Hydrogen Microjet at Variations of its Velocity Profile and Orientation of the Nozzle in the Field of Gravitation. *Combustion Science and Technology*, 2019, vol. 191, iss. 7, p. 1219–1235.

3. **Kozlov V. V., Grek G. R., Kozlov G. V., Litvinenko Yu. A., Shmakov A. G.** Experimental study on diffusion combustion of high-speed hydrogen round microjets. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2019, vol. 44, p. 457–468.
4. **Gao J., Hossain A., Nakamura Y.** Flame base structures of micro-jet hydrogen / methane diffusion flames. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2017, vol. 36, p. 4209–4216.
5. **Cheng T. S., Chao Y.-C., Wu C.-Y., Li Y.-H., Nakamura Y., Lee K.-Y., Yuan T., Leu T. S.** Experimental and numerical investigation of microscale hydrogen diffusion flames. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2005, vol. 30, p. 2489–2497.
6. **Cheng T. S., Wu C. Y., Chen C. P., Li Y.-H., Chao Y.-C., Yuan T., Leu T. S.** Detailed measurement and assessment of laminar hydrogen jet diffusion flames. *Combustion and Flame*, 2006, vol. 146, iss. 1–2, p. 268–282.
7. **Shmakov A. G., Grek G. R., Kozlov V. V., Litvinenko Yu. A., Korobeinichev O. P.** Diffusion Combustion of the Round Microjet Mixture of Hydrogen with Metane, Helium and Nitrogen. *Vestnik NSU. Series: Physics*, 2016, vol. 11, no. 2, p. 56–76. (in Russ.)
8. **Vikhorev V. V., Grek G. R., Kozlov V. V., Litvinenko Yu. A., Litvinenko M. V., Shmakov A. G.** Combustion of the Round Microjet of Hydrogen with Oxygen Mixture Efflux from the Curved Micronozzle. *Siberian Journal of Physics*, 2018, vol. 13, no. 1, p. 68–79. (in Russ.)
9. **Shmakov A. G., Vikhorev V. V., Grek G. R., Kozlov V. V., Kozlov G. V., Litvinenko Yu. A.** Combustion of the Round Microjet Premixed Hydrogen with Oxygen Efflux from the Linear Channel. *Siberian Journal of Physics*, 2018, vol. 13, no. 1, p. 54–67. (in Russ.)
10. **Jayaweera T. M., Melius C. F., Pitz W. J., Westbrook C. K., Korobeinichev O. P., Shvartsberg V. M., Shmakov A. G., Rybitskaya I. V., Curran H. J.** Flame Inhibition by Phosphorus-Containing Compounds over a Range of Equivalence Ratios. *Combustion and Flame*, 2005, vol. 140, p. 103–115.
11. **Babushok V., Noto T., Burgess D. R., Hamins A., Tsang W.** Influence of CF_3I , CF_3Br , and CF_3H on High-Temperature Combustion of Methane. *Combustion and Flame*, 1996, vol. 107, p. 351–367.
12. **Noto T., Babushok V. V., Hamins A., Tsang W.** Inhibition Effectiveness of Halogenated Compounds. *Combustion and Flame*, 1998, vol. 112, p. 147–160.
13. **Im H. G., Chen J. H.** Structure and propagation of triple flames in partially premixed hydrogen-air mixtures. *Combustion and Flame*, 1999, vol. 119, p. 436–454.
14. **Im H. G., Chen J. H.** Effect of flow strain on triple flame propagation. *Combustion and Flame*, 2001, vol. 126, p. 1384–1392.
15. **Baratov A. N., Korolchenko A. Ya., Kravchuk G. N. et al.** Pozharovzryvoopasnost veshchestv i materialov i sredstva ikh tusheniya. Spravochnik [Fire and explosion hazard of substances and materials and means of extinguishing. Reference book]. Moscow, Khimiya Publ., 1990, book 2, 384 p. (in Russ.)
16. **MacDonald M. A., Jayaweera T. M., Fisher E. M., Gouldin F. C.** Variation of Chemically Active and Inert Flame-Suppression Effectiveness with Stoichiometric Mixture Fraction. *27th Symposium (International) on Combustion*, 1998, vol. 27, p. 2749–2756.
17. **MacDonald M. A., Jayawera T. M., Fisher E. M., Gouldin F. C.** Inhibition of Non-Premixed Flames by Phosphorus-Containing Compounds. *Combustion and Flame*, 1999, vol. 116, p. 166–176.

Материал поступил в редколлегию
Received
01.02.2019

Сведения об авторах / Information about the Authors

Шмаков Андрей Геннадиевич, кандидат химических наук, заведующий лабораторией, Институт химической кинетики и горения им. В. В. Воеводского СО РАН (ул. Институтская, 3, Новосибирск, 630090, Россия); старший преподаватель, Новосибирский государственный университет (ул. Пирогова, 2, Новосибирск, 630090, Россия)

Andrey G. Shmakov, Doctor of Science (Chemistry), Head of Laboratory, Voevodsky Institute of Chemical Kinetics and Combustion SB RAS (3 Institutetskaya Str., Novosibirsk, 630090, Russian Federation); Chief Instructor, Novosibirsk State University (2 Pirogov Str., Novosibirsk, 630090, Russian Federation)
shmakov@kinetics.nsc.ru

Козлов Виктор Владимирович, доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник, Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН (ул. Институтская, 4/1, Новосибирск, 630090, Россия); профессор, Новосибирский государственный университет (ул. Пирогова, 2, Новосибирск, 630090, Россия)

Viktor V. Kozlov, Doctor of Science (Physics and Mathematics), Professor, Principal Researcher, Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS (4/1 Institutetskaya Str., Novosibirsk, 630090, Russian Federation); Professor, Novosibirsk State University (2 Pirogov Str., Novosibirsk, 630090, Russian Federation)
kozlov@itam.nsc.ru

Литвиненко Мария Викторовна, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник, Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН (ул. Институтская, 4/1, Новосибирск, 630090, Россия); ученый секретарь физического факультета, Новосибирский государственный университет (ул. Пирогова, 2, Новосибирск, 630090, Россия)

Maria V. Litvinenko, Doctor of Science (Physics and Mathematics), Senior Researcher, Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS (4/1 Institutetskaya Str., Novosibirsk, 630090, Russian Federation); Scientific Secretary Faculty of Physics, Novosibirsk State University (2 Pirogov Str., Novosibirsk, 630090, Russian Federation)
litmar@itam.nsc.ru

Литвиненко Юрий Алексеевич, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН (ул. Институтская, 4/1, Новосибирск, 630090, Россия)

Yuriy A. Litvinenko, Doctor of Science (Physics and Mathematics), Senior Scientist, Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS (4/1 Institutetskaya Str., Novosibirsk, 630090, Russian Federation)
litur@itam.nsc.ru