

УДК 62-83: 536.46

## О структуре прямого и обращенного диффузионного водородо-воздушного пламени\*

Д.О. КОЧЕРГИН<sup>1</sup>, Р.Х. АБДРАХМАНОВ<sup>2</sup>, В.В. ЛУКАШОВ<sup>3</sup>, В.В. ТЕРЕХОВ<sup>4</sup>

<sup>1</sup> 630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, студент. E-mail: [kochergindm@mail.ru](mailto:kochergindm@mail.ru)

<sup>2</sup> 630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, ассистент. E-mail: [orw@ngs.ru](mailto:orw@ngs.ru)

<sup>3</sup> 630090, РФ, г. Новосибирск, пр. акад. Лаврентьева, 1, Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, старший научный сотрудник, кандидат технических наук. E-mail: [luka@itp.nsc.ru](mailto:luka@itp.nsc.ru)

<sup>4</sup> 630090, РФ, г. Новосибирск, пр. акад. Лаврентьева, 1, Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, старший научный сотрудник, доктор физико-математических наук, профессор РАН. E-mail: [vt@itp.nsc.ru](mailto:vt@itp.nsc.ru)

В работе представлены результаты комплексного экспериментально-теоретического исследования реагирующих течений, образуемых ламинарной струей топлива в спутном потоке окислителя и струей окислителя в потоке топлива. В качестве топлива использовался водород, разбавляемый различными негорючими газами (азот, углекислота, неон), что позволяло варьировать теплофизические свойства топлива. Получены данные о полях температур, скоростей и концентраций в обеих указанных конфигурациях при различных соотношениях между скоростями струи и спутного потока в виде негорючего газа-разбавителя и его содержания в топливной смеси. Показано, что особенности процессов переноса тепла и вещества оказывают значительное влияние на горение. В частности, избирательная диффузия, которая является по существу отражением нарушения подобия между переносом тепла и диффузией в реагирующей смеси газов, может быть причиной таких необычных явлений, как превышение значения адиабатной температуры в обращенном пламени и локальное погасание пламени в окрестности вершины диффузионного факела. Анализ полученных экспериментальных данных показал, что температура фронта пламени в конфигурации «струя топлива в спутном потоке воздуха», не превышает адиабатную температуру сгорания, тогда как в обращенной конфигурации наблюдается область потока, где уровень температур может существенно (более 390 градусов) превышать адиабатную температуру сгорания исходной топливной смеси. Численное моделирование позволило получить не только тепловую картину пламени, но и распределения промежуточных веществ во фронте реакции. Это дало возможность проанализировать вклады отдельных компонент газовой смеси в суммарную энтальпию. В результате было установлено, что избирательный диффузионный перенос атомарного и молекулярного водорода оказывает основное влияние на характер распределения энтальпии и температуры в обращенном пламени.

**Ключевые слова:** горение, водород, воздух, газовая смесь, прямое пламя, обращенное пламя, адиабатная температура, локальное погасание, избирательная диффузия

DOI: 10.17212/1814-1196-2016-1-195-204

\* Статья получена 15 октября 2015 г.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, грант № 14-09-00402.

## ВВЕДЕНИЕ

Исследование особенностей процессов переноса тепла и вещества важно для понимания явлений, происходящих в энергетических установках, аппаратах химической технологии. В настоящее время при исследовании горения углеводородного топлива в воздухе большое внимание уделяется процессам образования сажи [1], устойчивости [2], условий снижения уровня окислов азота [3]. Правильное моделирование процессов переноса оказывает значительное влияние на качество прогнозов течений с горением. Одним из факторов, пренебрежение которым может приводить к качественно неверному описанию характера горения, оказывается избирательная диффузия составляющих газовой смеси.

Избирательная диффузия, выражающаяся в существенном отличии коэффициентов диффузии отдельных компонентов газовой смеси и коэффициента температуропроводности, приводит к нарушению подобия между диффузионными и тепловыми процессами в смеси газов, принимаемого во многих моделях реагирующих потоков. В ряде случаев использования моделей, принимающих приближение подобия процессов переноса, оказывается невозможным описать целый ряд наблюдаемых явлений. Отметим, что проявление избирательной диффузии наиболее существенно, когда молекулярный вес определенных компонентов газовой смеси (например, атомарного или молекулярного водорода) сильно отличается от остальных и наблюдается и в не реагирующих потоках. Так, при изотермическом течении воздуха в пограничном слое со вдувом гелия через пористую стенку, в процессе смешения [4] наблюдалось разделение воздуха, выражающееся в изменении соотношения между азотом и кислородом.

При горении отмечен ряд эффектов, которые без учета влияния избирательной диффузии объяснить невозможно, в частности, значительное превышение максимальных значений температуры над термодинамической адиабатной температурой сгорания. Это отмечается и при горении предварительно перемешанных пропано-воздушных смесей [5] вблизи верхнего концентрационного предела. В указанном случае максимальные значения температуры горения превышали на 60 К адиабатную температуру сгорания смеси для данного состава. Численный анализ горения заранее перемешанных смесей показал [6], что водородо-воздушные смеси, в отличие от богатых углеводородных составов, не позволяют получить сверхадиабатных температур.

В диффузионном пламени, в определенных условиях может наблюдаться локальное погасание в окрестности вершины диффузионного факела [7]. Влияние избирательной диффузии может сказываться на форме пламени. Так, в численном исследовании горения струи водорода в поперечном потоке воздуха [8] было показано, что более активный диффузионный перенос водорода по сравнению с переносом тепла приводит к тому, что водород перемещается в более холодную область. Это приводит к тому, что область, в которой соотношение реагентов соответствует стехиометрии, также смещается в зону более низких температур.

При анализе процессов переноса часто в качестве определяющих параметров выбираются числа Льюиса недостающего или избыточного реактанта [9]. Величина температуры пламени зависит от относительных скоростей диффузии тепла и вещества. Если число  $Le = a/D = 1$ , то полная энтальпия

сохраняется (в отсутствии эффектов второго порядка малости, таких как эффекты Соре или Дюфо) и максимальная температура пламени  $T_f$  соответствует адиабатной температуре сгорания  $T_{AD}$ . Если  $Le < 1$ , то  $T_f > T_{AD}$ , если  $Le > 1$ , то  $T_f < T_{AD}$ .

На структуру пламени могут влиять как число Льюиса окислителя, так и число Льюиса топлива. Поэтому иногда вводят эффективное число Льюиса [10]. Однако только «эффективных» чисел Льюиса не всегда достаточно для объяснения наблюдаемых эффектов. Так, например, было замечено [11], что температура в пламени смеси водорода, разбавленной аргоном, оказывается выше, чем при разбавлении гелием, хотя в смеси  $H_2/He$  число Льюиса выше, чем для  $H_2/Ar$ . Кроме того, надо учитывать и геометрический фактор. Эффекты в плоском пламени встречных струй могут отличаться от соосно организованных реагирующих потоков [12].

Аналитические оценки влияния неподобия процессов переноса при диффузионном горении выполнялись в работах [12–14] на простых идеализированных 1D и 2D моделях пламени Бурке–Шумана различной геометрии. Для анализа тепловых эффектов в [12] предлагается использовать безразмерную температуру  $R = (T_f - T_0)/(T_{AD} - T_0)$ , где  $T_0$  – начальная температура реагентов;  $T_{AD}$  – рассчитываемая в рамках классической термодинамики адиабатная температура сгорания [14]. При этом, по полученным в указанной работе оценкам, в случае  $Le \neq 1$  конвекция может приводить к тому, что  $0,4 < R < 1,5$ . Авторы [12] отмечают, что конвекция снижает эффект влияния  $Le_i \neq 1$ , если конвекция  $i$ -го вещества происходит в том же направлении, что и диффузия, и наоборот, обостряет эффекты, если диффузия и конвекция разнонаправлены.

Одним из способов организации течений с разнонаправленным диффузионными и конвективными потоками, при сохранении прочих параметров является совместное изучение прямого и обращенного пламени. Под прямым пламенем подразумевается горение топлива в среде окислителя, например, круглой струи топлива в спутном потоке воздуха, а обращенное горение происходит при подаче окислителя в атмосферу топлива. Сверхадиабатные значения температур были зарегистрированы в обращенном пламени при диффузионном горении смеси  $H_2/N_2$  в воздухе [15], где превышение величины температуры в пламени над адиабатной температурой сгорания составляло, по данным авторов, величину порядка 700 К. В то же время в прямом пламени температура фронта горения не превышала адиабатную.

Следует отметить, что в коммерческих газовых горелках обращенное пламя (IDF) используется довольно широко. Ссылка на IDF имеется в классической работе [16]. В настоящее время интерес к исследованию влияния различных факторов на эффективность горелок такого типа сохраняется [17–20].

В целом анализ литературы показывает, что, несмотря на определенный достигнутый прогресс в исследовании пламени со «сверхадиабатными» температурами, имеется весьма ограниченное количество экспериментальных данных, что, по-видимому, является одной из причин отсутствия простой физической интерпретации наблюдаемых тепловых эффектов. В настоящей работе представлены результаты экспериментального исследования и численного моделирования прямого и обращенного диффузионного пламени смесей водорода с негорючими газами ( $N_2$ ,  $CO_2$ ,  $Ne$ ) в воздухе. Вид газа-разбавителя выбирался таким образом, чтобы иметь возможность менять плотность, теплоспособность топлива и, соответственно, диапазон значений чисел Льюиса.

## 1. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

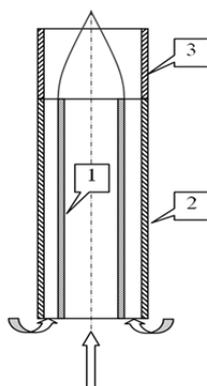


Рис. 1. Схема горелки

В качестве объекта исследований была использована горелка, схематично показанная на рис. 1. Две соосно ориентированные трубки из нержавеющей стали формируют кольцевой канал. Диаметр внутренней трубки 1 составляет 4,5 мм, внешней трубки 2 равен 7,5 мм. Площади проходного сечения трубки 1 и кольцевого канала между трубками 1 и 2 одинаковы. Это обеспечивает сохранение расхода топлива и окислителя в прямой и обращенной конфигурациях. Длина внешней трубки может варьироваться установкой секций 3 того же диаметра различной высоты вплоть до 60 мм. Измерения проводились у среза последней секции 3 в свободном от стенок пространстве. Подача реагентов производилась отдельно по оси внутренней трубки 1 и через кольцевой зазор между трубками. В настоящей работе рассмотрены два вида диффузионного пламени – прямое и обращенное. В первом случае топливная смесь подавалась через трубку 1, а воздух – через кольцевой канал между трубками 1 и 2. Для организации обращенного пламени порядок подачи реагентов менялся местами.

Для подготовки топливной смеси были использованы регуляторы расхода газа производства MKS Instruments: для водорода использовался регулятор типа 1179А, для инертного газа-разбавителя применялся регулятор 1579А. Погрешность определения состава топливной смеси не превышала  $\pm 0,1\%$  по объему. При проведении экспериментальных исследований для измерения температуры в диапазоне от 300 до 1800 °С применялась Pt/Pt-Rh термопара ТПР-0392-01 диаметром проводов 120 мкм. Известно, что показания платиновой термопары в реагирующем газовом потоке могут быть завышены под воздействием каталитического эффекта. С другой стороны, излучение термопарной проволоки охлаждает спай. Мы не проводили какой-либо коррекции измерений температуры. Мы полагаем, что в прямом и обращенном пламени условия измерений сохраняются одинаковыми. Кроме того, достоверность измерений подтверждается сопоставлением с результатами численного моделирования.

Измерения распределений температуры проводились вдоль диаметра горелки на удалении от среза внутренней трубки 10, 20, 30, 40 и 50 мм. Набор полученных профилей с использованием интерполяции преобразовывался в поле температуры. Кроме того, для контроля динамических характеристик потока методом PIV было проведено измерение поля скорости вблизи среза горелки на расстоянии 10 мм от края внутренней трубки. Распределение скорости при горении топливной смеси  $H_2/N_2$ , содержащей

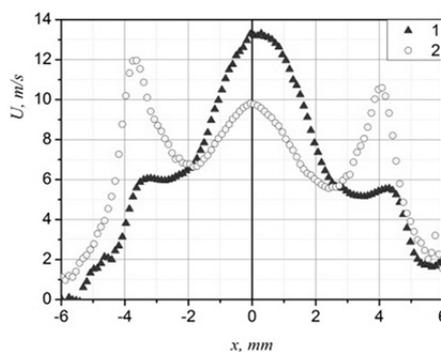


Рис. 2. Профили осевой компоненты средней скорости на выходе из горелки:

1 – прямое; 2 – обращенное пламя

водород  $K_{\text{H}_2}^1 = 2\%$  по массе в потоке воздуха, показано на рис. 2. Среднемассовая скорость топливной смеси  $U_f = 10$  м/с, среднемассовая скорость воздуха  $U_a = 5$  м/с. Величины чисел Рейнольдса для рассмотренных топливных смесей не превышали 1000.

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Характерные распределения температуры представлены на рис. 3 при различных значениях параметра спутности  $m$  и коэффициента избытка окислителя  $\alpha$ . Здесь в левой половине каждого рисунка показано поле температуры обычного пламени, в правой – результаты для обращенного пламени. Сплошной линией отмечено значение адиабатной температуры сгорания ( $1200^\circ\text{C}$ ) данного топлива при горении в заранее перемешанной смеси с воздухом.

Как видно из приведенных данных, при обычной схеме подачи реагентов максимальные значения температур  $T_f$  не превышают адиабатных значений. В случае же обращенного пламени имеются области, в которых температура оказывается почти на  $300$  градусов выше. Эта область аномально высоких температур может соответствовать «вершине» пламени (рис. 3, б) или же, как в режимах, соответствующих опытам (рис. 3, а и в), оказывается локализованной вблизи среза внутренней трубки горелки. Другим эффектом проявления избирательной диффузии является «open tip flame» (незамкнутое пламя) (рис. 3, в) для обычного пламени. В этом случае пламя не смыкается вблизи предполагаемой вершины. Измеренные поля температур при горении смеси водорода с неонem представлены на рис. 4. Так же как и в предыдущем случае, максимальные значения температур в обращенном пламени оказываются выше адиабатной температуры сгорания  $1370^\circ\text{C}$ . Однако, в отличие от  $\text{H}_2/\text{CO}_2$  локального погасания отмечено не было. Заметим, что в случае прямого пламени смеси  $2\%$   $\text{H}_2/\text{Ne}$  происходит самопроизвольное погасание, тогда как обращенная конфигурация демонстрирует устойчивое горение.

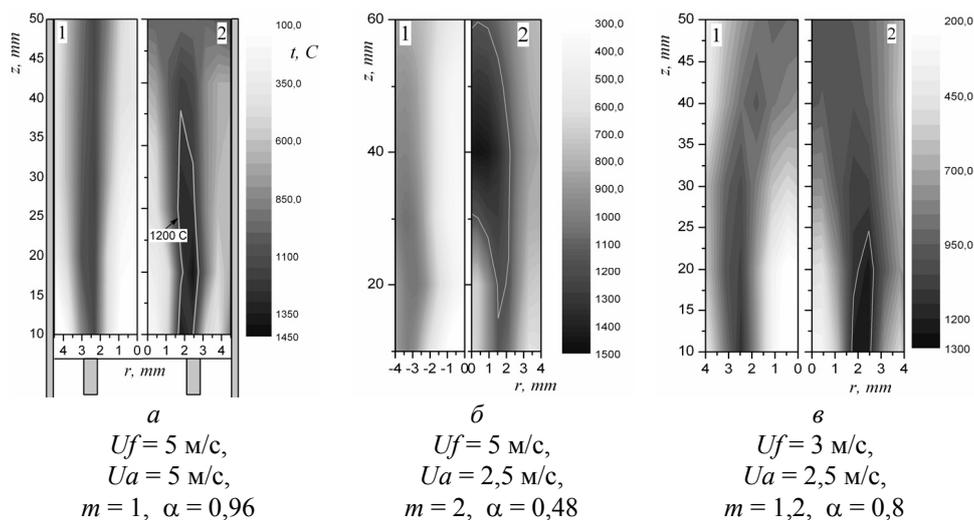


Рис. 3. Поля температуры при горении  $2\%$  по массе топливной смеси водорода в  $\text{CO}_2$ :

1 – обычное пламя; 2 – обращенное

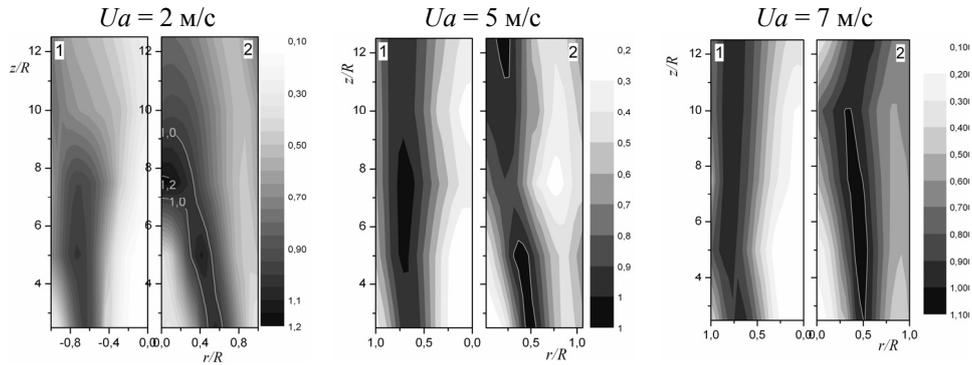
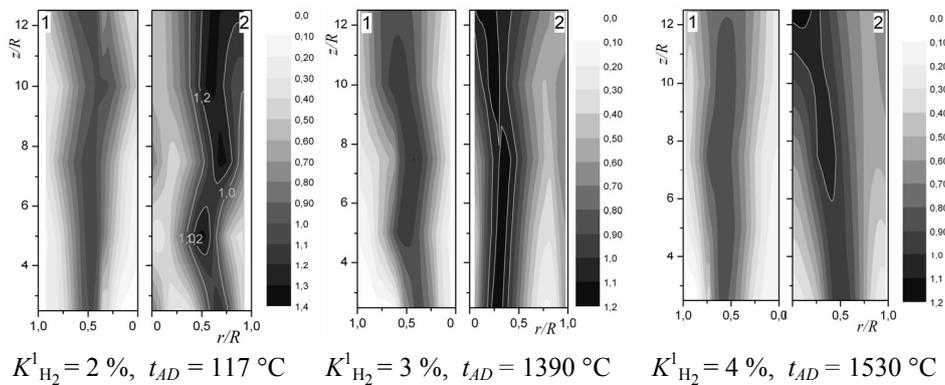


Рис. 4. Поле значений  $R = (T_f - T_0)/(T_{AD} - T_0)$ . Горение смеси  $H_2/Ne$  в воздухе. Массовая доля водорода 2,6 %,  $U_f = 10$  м/с



$K^1_{H_2} = 2\%$ ,  $t_{AD} = 117^\circ C$      $K^1_{H_2} = 3\%$ ,  $t_{AD} = 1390^\circ C$      $K^1_{H_2} = 4\%$ ,  $t_{AD} = 1530^\circ C$

Рис. 5. Поле значений  $R$ . Горение смеси  $H_2/N_2$ ,  $U_f = 10$  м/с,  $U_a = 5$  м/с

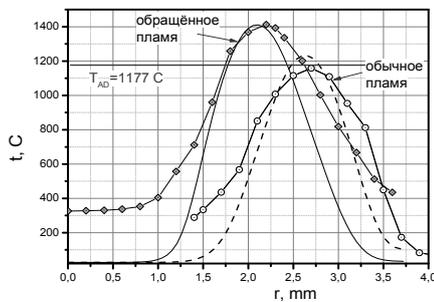


Рис. 6. Распределения температуры,  $H_2/N_2$ ,  $K^1_{H_2} = 2\%$ ,  $U_f = 10$  м/с,  $U_a = 5$  м/с,  $Z = 10$  мм. Линии – численный расчет  $K^1_{H_2} = 2,5\%$

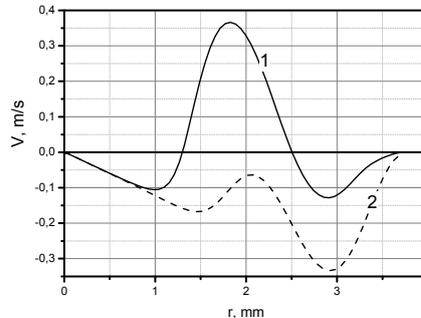


Рис. 7. Распределения радиальной компоненты скорости,  $H_2/N_2$ ,  $K^1_{H_2} = 2,4\%$ ,  $U_f = 10$  м/с,  $U_a = 5$  м/с, 1 – обращённое пламя, 2 – обычное,  $Z = 10$  мм

Влияние содержания водорода в топливной смеси на распределение температур демонстрируют данные, показанные на рис. 5. Повышение доли  $H_2$  наиболее сильно сказывается на форме обращенного пламени. При  $K^i_{H_2} = 2\%$  водорода фронт пламени располагается вблизи внутренней поверхности канала. Рост концентрации водорода до 6 % приводит к тому, что фронт пламени смыкается на оси течения.

Несколько режимов с горением топливной смеси  $H_2/N_2$  было исследовано численно. Подробное описание использованной модели изложено в работе [21]. Сопоставление опытных данных и результатов моделирования показано на рис. 6. Значения температуры фронта и в случае обычного пламени и обращенного с хорошей точностью совпадают. Важным обстоятельством, позволяющим объяснить наблюдаемые тепловые эффекты, являются данные о распределении радиальной компоненты скорости, показанные на рис. 7. Радиальная компонента в данном случае почти перпендикулярна положению фронта пламени. В обращенном пламени имеется протяженная область пространства, в котором конвективное движение направлено от оси в область высоких температур. В этом случае для газовых смесей, в которых  $Le \neq 1$ , температура фронта пламени, по оценкам [12, 13], может превышать адиабатную температуру сгорания.

С помощью численного моделирования были получены распределения состава газовой смеси (рис. 8). Здесь  $r_f$  – координата фронта пламени в данном сечении. Сопоставление профилей для прямого и обращенного пламени позволяет сделать заключение о том, что концентрации промежуточных продуктов, таких как радикалы  $OH$ , и особенно  $H$ , в обращенном пламени существенно превышают значения, характерные для прямого пламени.

В то же время максимальные значения концентрации конечного продукта –  $H_2O$  – и в первом, и во втором пламени оказываются сопоставимы. Это позволяет сделать вывод о том, что режимы со сверхадиабатными температурами определяются не только термодинамикой и химической кинетикой рассматриваемой системы, но и соотношениями между конвективными и диффузионными процессами переноса тепла и вещества.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показано, что температура фронта пламени в прямой конфигурации не превышает  $t_{AD}$  адиабатную температуру сгорания (левая область на рис. 1), тогда как в обращенном пламени наблюдается область потока (указана сплошной линией в правой части рисунка), где уровень температур может быть выше  $t_{AD}$ . Превышение адиабатной температуры сгорания могло достигать в опытах 390 градусов. Численное моделирование позволило получить не только тепловую картину пламени, но распределения промежуточных веществ во фронте реакции. Это дало возможность проанализировать вклады отдельных веществ в энтальпию газовой смеси. В результате установлено, что избирательный диффузионный перенос атомарного и молекулярного водорода оказывает основное влияние на характер распределения энтальпии и температуры в обращенном пламени.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Flamelet-modeling of inverse rich diffusion flames / F. Hunger, B. Stelzner, D. Trimis, C. Hasse // *Flow Turbulence Combust.* – 2013. – Vol. 90. – P. 833–857. – doi: 10.1007/s10494-012-9422-z.
2. Алексеев М.М., Самсонов В.П. Стабилизация обращенного пропано-воздушного пламени на струне, натянутой вдоль потока // *Физика горения и взрыва.* – 2009. – Т. 45, № 2. – С. 3–11.

3. Назаров А.В., Шторк С.И. Исследование пламени в модели мезомасштабной камеры сгорания // Научный вестник НГТУ. – 2014. – № 1 (54). – С. 114–121.
4. Лукашов В.В., Жиливостова С.В. О проявлении многокомпонентной диффузии в ламинарном пограничном слое с инородным вдувом // ТИА. – 2008. – Т. 15, № 3. – С. 505–511.
5. On the nature of superadiabatic temperatures in premixed rich hydrocarbon flames / V.V. Zama-shchikov, I.G. Namyatov, V.A. Bunev, V.S. Babkin // Combustion, Explosion, and Shock Waves. – 2004. – Vol. 40, N 1. – P. 32–35.
6. Numerical study of the superadiabatic flame temperature phenomenon in hydrocarbon pre-mixed flames / F. Liu, H. Guo, G.J. Smallwood, O.L. Gulder // Proceedings of the Combustion Institute. – 2002. – Vol. 29 – P. 1543–1550.
7. Ishizuka S., Sakai Y. Structure and tip-opening of laminar diffusion flame // 21<sup>st</sup> Symposium (International) on Combustion, Munich, West Germany, 3–8 August 1986. – Pittsburgh, PA, 1986. – P. 1821–1828.
8. On flames established with air jet in cross flow of fuel-rich combustion products / V.R. Katta, D.L. Blunck, N. Jiang, A. Lynch, J.R. Gord, S. Roy // Fuel. – 2015. – Vol. 150. – P. 360–369.
9. Термогазодинамика горения и взрыва водорода / Б.Е. Гельфанд, М.Е. Сильников, С.П. Медведев, С.В. Хомик. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2009. – 584 с.
10. Chen R.-H., M. Chaos M., Kothawala A. Lewis number effects in laminar diffusion flames near and away from extinction // Proceedings of the Combustion Institute. – 2007. – Vol. 31. – P. 1231–1237.
11. Effects of Lewis number and preferential diffusion on flame characteristics in 80%H<sub>2</sub>/20%CO syngas counter flow diffusion flames diluted with He and Ar / J. Park, D.H. Lee, S.H. Yoon, T.M. Vu, J.H. Yun, S.I. Keel // International Journal of Hydrogen Energy. – 2009. – Vol. 34. – P. 1578–1584.
12. Law C.K., Chung S.H. Steady state diffusion flame structure with Lewis number variations // Combustion Science and Technology. – 1982. – Vol. 29. – P. 129–145.
13. Chung S.H., Law C.K. Burke–Schumann flame with stream wise and preferential diffusion // Combustion Science and Technology. – 1984. – Vol. 37, N 1–2. – P. 21–46.
14. Law C.K. Combustion physics. – Cambridge: Cambridge University Press, 2010. – 742 p.
15. Takagi T., Xu Z., Komiyama M. Preferential diffusion effects on the temperature in usual and inverse diffusion flames // Combustion and Flame. – 1996. – Vol. 106. – P. 252–260.
16. Burke S.P., Schumann T.E.W. Diffusion Flames // Industrial & Engineering Chemistry. – 1928. – Vol. 20, N 10. – P. 998–1004. – doi: 10.1021/ie50226a005.
17. Sze L.K., Cheung C.S., Leung C.W. Appearance, temperature, and NO<sub>x</sub> emission of two inverse diffusion flames with different port design // Combustion and Flame. – 2006. – Vol. 144. – P. 237–248.
18. Structure of laminar sooting inverse diffusion flames / M.A. Mikofsky, T.C. Williams, C.R. Shaddix, L.G. Blevins // Combustion and Flame. – 2007. – Vol. 149. – P. 463–478.
19. Wu K.T., Essenhigh R.H. Mapping and structure of inverse diffusion flames of methane // 20<sup>th</sup> Symposium (International) on Combustion, Ann Arbor, Michigan, 12–17 August, 1984. – Pittsburgh, PA, 1984. – P. 1925–1932.
20. Elbaz A.M., Roberts W.L. Experimental study of the inverse diffusion flame using high repetition rate OH/acetone PLIF and PIV // Fuel. – 2016. – Vol. 165. – P. 447–461.
21. Characterization of the flame blow-off conditions in a laminar boundary layer with hydrogen injection / E.P. Volchkov, V.V. Lukashov, V.V. Terekhov, K. Hanjalic // Combustion and Flame. – 2013. – Vol. 160. – P. 1999–2008.

Лукашов Владимир Владимирович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник ИТ СО РАН. Основное направление научных исследований – тепломассообмен реагирующих течений. Имеет более 60 публикаций. E-mail: luka@itp.nsc.ru

Терехов Владимир Викторович, доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник ИТ СО РАН. Основное направление научных исследований – тепло-массообмен реагирующих течений. Имеет более 60 публикаций. E-mail: vt@itp.nsc.ru

Кочергин Дмитрий Олегович, студент энергетического факультета Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – тепломассообмен реагирующих течений. Имеет более двух публикаций. E-mail: kochergindm@mail.ru

Абдрахманов Рифат Хабибрахманович, ассистент кафедры технической теплофизики Новосибирского государственного технического университета. Основное направление исследований – гидродинамика и тепломассообмен закрученных потоков. Имеет более 20 публикаций. E-mail: orw@ngs.ru

### ***On the structure of direct and inverse diffusion of the hydrogen-air flame***\*

D.O. KOCHERGIN<sup>1</sup>, R.K. ABDRAKHMANOV<sup>2</sup>, V.V. LUKASHOV<sup>3</sup>, V.V. TEREKHOV<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Novosibirsk State Technical University, 20, K. Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation, student. E-mail: kochergindm@mail.ru

<sup>2</sup> Novosibirsk State Technical University, 20, K. Marx Prospekt, Novosibirsk, assistant lecturer. E-mail: orw@ngs.ru

<sup>3</sup> Kutateladze Institute of Thermophysics, SB RAS, Novosibirsk, 1, Lavrent'ev Avenue, 630090, Russian Federation, D. Sc. (Eng.). E-mail: luka@itp.nsc.ru

<sup>4</sup> Kutateladze Institute of Thermophysics, SB RAS, Novosibirsk, 1, Lavrent'ev Avenue, 630090, Russian Federation, D. Sc. (Phys. & Math.), professor. E-mail: vt@itp.nsc.ru

The paper presents the results of comprehensive experimental - theoretical studies of reacting flows generated by a laminar fuel jet in the co current flow of an oxidant and oxidant flow in the fuel jet. The fuel was hydrogen diluted by various non-flammable gases (nitrogen, carbon dioxide, and neon), and this allowed variations of thermal fuel properties. Data on the temperature fields, velocity and concentration in these configurations for different relations between the jet speed and the co current flow as well as a noncombustible diluent gas and its content in the fuel mixture were obtained. It is shown that the characteristics of heat transfer processes and substances have significant effects on combustion. In particular, preferential diffusion which is essentially the reflection of non-similarity between heat transfer and diffusion in the reacting gas mixture may cause unusual phenomena such as an excess of the adiabatic flame temperature and local flame extinction in the neighborhood of the diffusion flame tip. An analysis of the experimental data has shown that the flame front temperature when the fuel jet is in the co current air flow (usual flame), does not exceed the adiabatic combustion temperature, whereas in the inverse flame the level of temperature can be significantly higher (390 degrees) than the adiabatic combustion temperature of the original fuel mixture. Numerical modeling made it possible to obtain not only a heat image of the flame, but also the distribution of the intermediates of the reaction front. This gave an opportunity to examine the contributions of individual components of the gas mixture to the total enthalpy. As a result, it has been found that preferential diffusion transfer of atomic and molecular hydrogen has a major influence on the temperature and enthalpy distribution in the inverse flame.

**Keywords:** Burning; hydrogen; air and gas mixture; usual and inverse flame; adiabatic temperature; local extinction; preferential diffusion

DOI: 10.17212/1814-1196-2016-1-195-204

### **REFERENCES**

1. Hunger F., Stelzner B., Trimis D., Hasse C. Flamelet-modeling of inverse rich diffusion flames. *Flow Turbulence Combust*, 2013, vol. 90, pp. 833–857. doi: 10.1007/s10494-012-9422-z
2. Alekseev M.M., Samsonov V.P. Stabilizatsiya obrashchennogo propano-vozdushnogo plameni na strune, natyanutoi vdol' potoka [Stabilization of an Inverted Propane–Air Flame on a String Stretched along the Flow]. *Fizika goreniya i vzryva – Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 2009, vol. 45, no. 2, pp. 111–118.
3. Nazarov A.V., Shtork S.I. Issledovanie plameni v modeli mezomasshtabnoi kamery sgoraniya [Investigation of flame in a model of mesoscale combustion chamber]. *Nauchnyi vestnik*

---

\* Received 15 October 2015.

*Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2014, no. 1 (54), pp. 114–121.

4. Lukashov V.V., Zhilivostova S.V. O proyavlenii mnogokomponentnoi diffuzii v laminarnom pograničnom sloe s inorodnym vduvom [On a multicomponent diffusion manifestation in the laminar boundary layer with foreign gas injection]. *Teplofizika i aeromekhanika – Thermophysics and Aeromechanics*, 2008, vol. 15, no. 3, pp. 505–511.

5. Zamashchikov V.V., Namyatov I.G., Bunev V.A., Babkin V.S. On the nature of superadiabatic temperatures in premixed rich hydrocarbon flames. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 2004, vol. 40, no. 1, pp. 32–35. Translated from *Fizika gorenija i vzryva*, 2004, vol. 40, no. 1, pp. 38–41.

6. Liu F., Guo H., Smallwood G.J., Gulder O.L. Numerical study of the superadiabatic flame temperature phenomenon in hydrocarbon premixed flames. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2002, vol. 29, pp. 1543–1550.

7. Ishizuka S., Sakai Y. Structure and tip-opening of laminar diffusion flame. *21<sup>st</sup> Symposium (International) on Combustion*, Munich, West Germany, 3–8 August 1986, pp. 1821–1828.

8. Katta V.R., Blunck D.L., Jiang N., Lynch A., Gord J.R., Roy S. On flames established with air jet in cross flow of fuel-rich combustion products. *Fuel*, 2015, vol. 150, pp. 360–369.

9. Gel'fand B.E., Sil'nikov M.E., Medvedev S.P., Khomik S.V. *Termogazodinamika gorenija i vzryva vodoroda* [Thermogasdynamics of hydrogen combustion and explosion]. St. Petersburg, Politehnicheskii universitet Publ., 2009. 584 p.

10. Chen R.-H., Chaos M., Kothawala A. Lewis number effects in laminar diffusion flames near and away from extinction. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2007, vol. 31, pp. 1231–1237.

11. Park J., Lee D.H., Yoon S.H., Vu T.M., Yun J.H., Keel S.I. Effects of Lewis number and preferential diffusion on flame characteristics in 80% $H_2$ /20% $CO$  syngas counterflow diffusion flames diluted with He and Ar. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2009, vol. 34, pp. 1578–1584.

12. Law C.K., Chung S.H. Steady state diffusion flame structure with Lewis number variations. *Combustion Science and Technology*, 1982, vol. 29, pp. 129–145.

13. Chung S.H., Law C.K. Burke–Schumann flame with streamwise and preferential diffusion. *Combustion Science and Technology*, 1984, vol. 37, no. 1–2, pp. 21–46.

14. Law C.K. *Combustion physics*. Cambridge, Cambridge University Press, 2010. 742 p.

15. Takagi T., Xu Z., Komiyama M. Preferential diffusion effects on the temperature in usual and inverse diffusion flames. *Combustion and Flame*, 1996, vol. 106, pp. 252–260.

16. Burke S.P., Schumann T.E.W. Diffusion Flames. *Industrial & Engineering Chemistry*, 1928, vol. 20, no. 10, pp. 998–1004. doi: 10.1021/ie50226a005

17. Sze L.K., Cheung C.S., Leung C.W. Appearance, temperature, and  $NO_x$  emission of two inverse diffusion flames with different port design. *Combustion and Flame*, 2006, vol. 144, pp. 237–248.

18. Mikofsky M.A., Williams T.C., Shaddix C.R., Blevins L.G. Structure of laminar sooting inverse diffusion flames. *Combustion and Flame*, 2007, vol. 149, pp. 463–478.

19. Wu K.T., Essenhigh R.H. Mapping and structure of inverse diffusion flames of methane. *20<sup>th</sup> Symposium (International) on Combustion*, Ann Arbor, Michigan, 12–17 August, 1984, pp. 1925–1932.

20. Elbaz A.M., Roberts W.L. Experimental study of the inverse diffusion flame using high repetition rate OH/acetone PLIF and PIV. *Fuel*, 2016, vol. 165, pp. 447–461.

21. Volchkov E.P., Lukashov V.V., Terekhov V.V., Hanjalic K. Characterization of the flame blow-off conditions in a laminar boundary layer with hydrogen injection. *Combustion and flame*, 2013, vol. 160, pp. 1999–2008.