

ОБ УСЛОВИЯХ СРЫВА ПЛАМЕНИ В ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ СО ВДУВОМ И ГОРЕНИЕМ ВОДОРОДА

Э.П.Волчков, В.В. Лукашов, В.В. Терехов

Федеральное государственное учреждение науки Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе, Новосибирск, Россия

Одним из важнейших аспектов горения является его стабильность. Условия срыва пламени в пограничном слое при испарении и горении жидкого топлива рассматривались в работах [1, 2]. Оба исследования одинаково объясняют механизм погасания. По мере увеличения скорости основного потока U_0 передняя кромка пламени постепенно сдвигается на расстояние x^* вниз по потоку. В ламинарном режиме течения $x^* \sim U_0$. При турбулентном обтекании пластины $x^* \sim U_0^4$ [2]. Исследование воздействия возмущения внешнего потока на условия срыва пламени при испарении и горении этанола рассматривались в [3].

Определению параметров течения, при которых происходит срыв пламени в пограничном слое со вдувом газообразного топлива посвящено лишь несколько экспериментальных работ. В [4] исследовано влияние разбавления H_2 или CH_4 инертным газом на условия срыва при поперечном обтекании пористого цилиндра. В [5] при вдуве метана в пограничном слое выявлен сложный характер влияния скорости основного потока и геометрии стабилизатора пламени на условия срыва и устойчивость потока.

Имеющихся в литературе данных, безусловно, недостаточно для построения обобщенной картины процесса. Цель данной работы – получить данные об условиях срыва пламени в ламинарном пограничном слое при равномерном вдуве через горизонтальную пористую пластину топливной смеси H_2/N_2 или H_2/He в поток воздуха.

Экспериментальное исследование проводилось в дозвуковой аэродинамической трубе с сечением канала на входе в рабочую часть 105x105 мм. Скорость воздушного потока, обтекающего пластину, варьировалась в диапазоне 1...10 м/с. Температура основного потока воздуха поддерживалась равной 293К. Топливо, в качестве которого использовалась смесь водорода с азотом (гелием), вдувалось равномерно в пограничный слой через нижнюю горизонтальную пористую пластину с размером в плане $S=95 \times 145$ мм. Для подготовки топливной смеси были использованы регуляторы расхода газа производства MKS Instruments. Погрешность определения состава топливной смеси не превышала $\pm 0.4\%$.

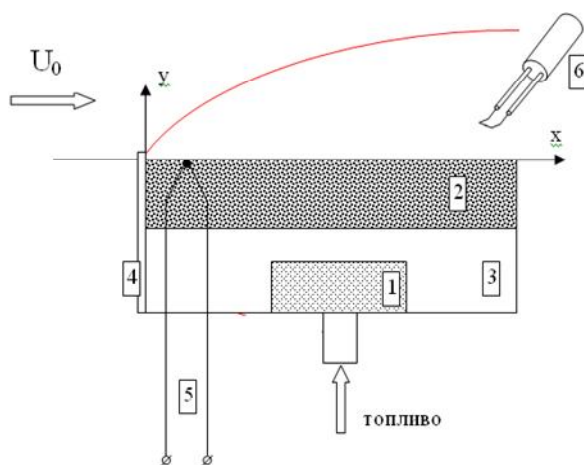


Рис.1. Схема рабочего участка.

В некоторых опытах останавливалось ребро- стабилизатор пламени (4) толщиной 0.8 мм. Его высота над плоскостью пористой поверхности Н могла изменяться в диапазоне от 0 до 3 мм. Пористая пластина (2) была изготовлена из материала ТЗМК-10 (газопроницаемый материал на основе аморфного кварцевого волокна. Коэффициент теплопроводности этого материала при 20С - 0.05 Вт/м/К, его пористость 90-95%. Он способен выдерживать температуры до 1370 К (в наших опытах значения температуры поверхности не превышали 1100К), сохраняя при этом диэлектрические свойства, что позволяет размещать в пористом теле термопары для измерения температуры поверхности (5) (хромель- алюмель диаметром 100 мкм) не используя электрическую изоляцию. Измерения профилей температуры в различных сечениях пограничного слоя проводились с помощью хромель- алюмелевой термопары (6), для в диапазоне температур газового потока до 1500К относительная величина занижения показаний $\Delta T / T$ не превышает 2%, так что поправок показаний термопарного зонда на излучение не делалось.

Теоретически, критерием воспламенения является способность пламени распространяться в газовой смеси. Опыт же исследования концентрационных пределов воспламенения гомогенных газовых смесей [6] свидетельствует о том, что существует диапазон параметров, при которых возможно распространение пламени с последующим погасанием. Результаты измерений в таких условиях могут зависеть от особенностей поджига, ориентации экспериментальной установки относительно силы тяжести и других факторов. В связи с этим, в данной работе проводились исследования как условия срыва пламени, так и условия воспламенения.

В экспериментах процедура определения момента воспламенения заключалась в фиксации условий, при которых от пламени горелки, поднесённой к задней кромке пористой пластины, горение распространялось в пограничный слой. При этом задавались постоянными скорость основного потока и массовый расход инертного компонента топливной смеси. Расход водорода постепенно увеличивался до тех пор, пока не происходило воспламенения. Перед началом каждого следующего опыта температура пористой стенки охлаждалась до комнатной температуры. Исследования условий срыва пламени проводились иначе. При постоянной интенсивности вдува топливной смеси постоянного состава постепенно увеличивалась скорость основного потока. При определённом значении скорости основного потока $U_0=U^*$ температура поверхности резко падала, горение над поверхностью пористой пластины прекращалось. В опытах по определению срыва пламени было использовано два типа пористого материала

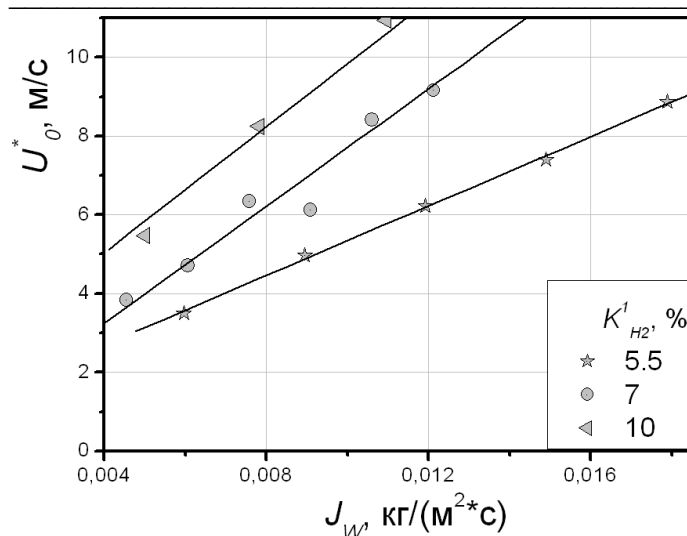


Рис.2. Зависимость скорости срыва пламени от массового потока топливной смеси H_2/N_2

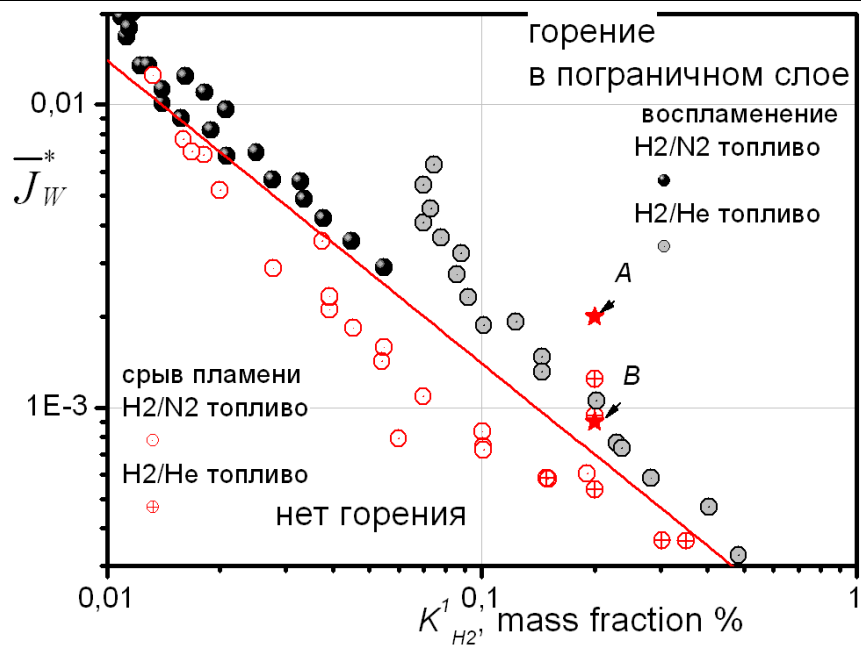


Рис.3. Карта режимов горения смесей H₂/N₂, H₂/He в пограничном слое при обтекании пористой пластины воздухом

стенки – ТЗМК-10 и пористая нержавеющая сталь, различающихся на порядок по величине теплопроводности, однако, различия в результатах, получаемых на том и другом материалах, выявлено не было. Установка ребра- стабилизатора пламени высотой H=1...3 мм так же не отразилась на условиях срыва/ воспламенения.

На Рис. 2 представлены данные о зависимости скорости набегающего потока, при которой происходит погасание от J_w - массового потока топливной смеси. Можно видеть, что по мере увеличения массовой концентрации водорода в топливной смеси скорость, при которой пламя гаснет, возрастает. U^* возрастает пропорционально массовому расходу топливной смеси, что позволяет обобщить данные в зависимости от относительного параметра вдува $\bar{J}_w^* = J_w / (\rho_0 U_0^*)$ (Рис. 3).

Отметим несколько важных моментов. Во-первых, с уменьшением содержания водорода в смеси требуемая для устойчивого горения интенсивность вдува увеличивается и при концентрации водорода менее 0.5% течение в пограничном слое не воспламеняется практически при любых расходах топлива. Как и следует ожидать, эта величина концентрации водорода оказывается близкой к значению нижнего предела воспламенения заранее перемешанной смеси. Дополнительные исследования, проведенные при горении водорода разбавленного гелием, приведенные на данном рисунке подтверждают этот факт.

Кроме того, можно видеть, что процессы воспламенения (светлые точки на рисунке) и погасания (темные точки) подчиняются одной закономерности.

По-видимому, в случае вдува водородного топлива погасание может происходить вследствие снижения температуры фронта пламени при разбавлении топлива инертной добавкой или в условиях, когда положение фронта пламени (области максимальных температур в данном сечении пограничного слоя) начинает приближаться к стенке (Рис.3). Точки А на Рис.3. соответствует режиму приведённому на Рис.4А, точка В - условиям Рис.4В. Видно, что по мере приближения к условиям срыва толщина фронта пламени (области максимальной температуры в данном сечении) и значение температуры фронта перестают изменяться по длине. В таких режимах возможен срыв пламени одновременно по всей пластине.

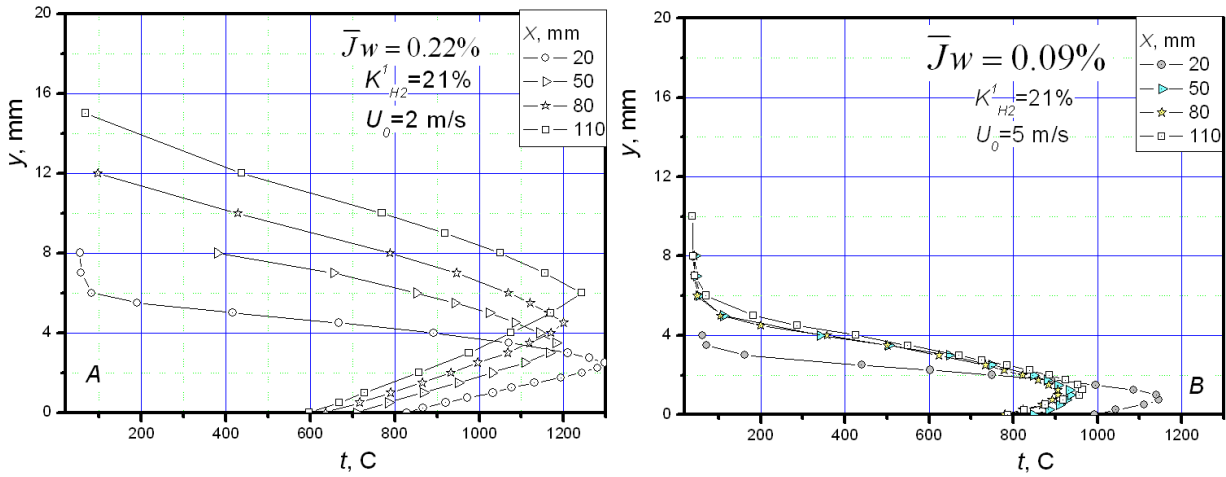


Рис.4. Распределения температуры в пограничном слое. Топливо – смесь H_2/N_2

Линейную зависимость \bar{J}_w^* от $K_{H_2}^1$ можно получить аналитически, используя приближение подобия атомарных концентрация в пограничном слое. Исходя из определения параметра проницаемости:

$$b_1 = \frac{j_w}{\rho_0 U_0 S t_D} = \frac{\Delta K}{K_i' - (K_i)_w}$$

и предполагая, что погасание наступает в условиях, когда фронт пламени достигает стенки:

$$b_1^* = \frac{(K_H)_w (K_O)_0}{(K_O)_w K_H}$$

Соотношение $(K_H)_w / (K_O)_w$ можно оценить, используя стехиометрическое соотношение. Тогда для случая ламинарного обтекания пластины, можно записать:

$$\bar{J}_{CT}^* = \frac{(K_H)_{CT} (K_O)_0}{(K_O)_{CT} K_H} S t_0 \Psi = \frac{(K_H)_{CT} (K_O)_0}{(K_O)_{CT} K_H} \frac{0.332}{\sqrt{Re_x}} \Psi$$

Эта же формула подтверждает линейную зависимость x^* и U_0 для ламинарного режима течения, которые входят в число Рейнольдса в первой степени. Аналогичные рассуждения для турбулентного режима течения показывают, что в этом случае координата x^* пропорциональна четвертой степени скорости набегающего потока.

Проведенное численное моделирование горения водородо-азотной смеси в пограничном слое в постановке двумерных нестационарных уравнений Навье-Стокса и химической кинетики также показало, что в ламинарном режиме течения начало зоны горения смещается от начала пластины прямо пропорционально скорости набегающего потока, а в турбулентном пропорционально ее четвертой степени. Кроме того, результаты численного моделирования, которые, как показано на рис. 5, достаточно хорошо описывают экспериментальные данные позволили восстановить значения концентраций веществ на стенке необходимые при анализе процессов тепломассопереноса, и которые весьма сложно определить в эксперименте.

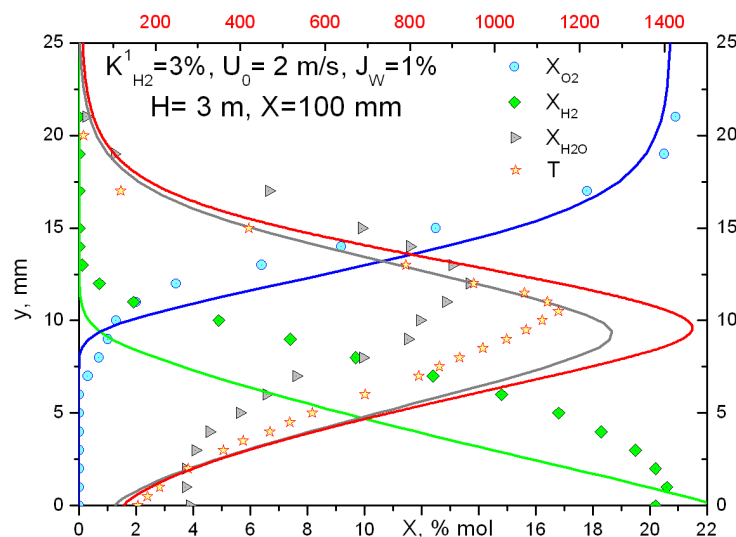


Рис. 5. Распределение топлива, окислителя и температуры в одном из сечений ламинарного пограничного слоя с горением водорода. Точки - эксперимент, линии - результаты численного моделирования.

Таким образом, на основе экспериментальных данных, результатов численного моделирования и теоретического анализа можно сделать вывод, что условия воспламенения и погасания пламени в пограничном слое на пористой пластине можно описать двумя величинами - безразмерным параметром вдува и концентрацией водорода в топливной смеси. При этом оказывается, что вдув, при котором происходит погасание обратно пропорционален концентрации водорода. Исследование механизма погасания пламени, при котором фронт приближается к стенке показывает, что при увеличении скорости набегающего потока зона горения смещается вниз по потоку линейно в ламинарном режиме течения и по закону четвертой степени в турбулентном.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента РФ НШ-4349.2010.8 и гранта РФФИ №12-08-00730а.

Литература

1. Mao C.-P., Kodama H., Fernandez-Pello A.C. Convective Structure of a diffusion flame over a flat Combustible surface// *Combustion and flame*. 1984. No 57. P. 209-236
2. Yarin A.L. On the flame extinction of the burning liquid by air stream // *Combustion and shock waves*. 1983. Vol. 19, No 1. P. 3-12.
3. Boyarshinov B.F., Volchkov E.P., Titkov V.I. Experimental study of the diffusion combustion in the boundary layer in the presence of external gas- dynamic perturbations // *Russian Journal of Physical Chemistry B*. 2004. Vol.23, N 8. P. 49-53.
4. Ishizuka S., Tsudji H. An experimental study of effect of inert gases on extinction of laminar diffusion flames// *Eighteenth Symp. (International) on Combustion*, The Combustion Institute, Pittsburg, PA. 1981. P. 695-703.
5. Rohmat T.A., Katoh H., Obara T., Yoshohashi T., Ohyagi S. Diffusion flame stabilized on a porous plate in a parallel airstream// *AIAA Journal*. 1998. Vol.36, N. 11. P. 1945-1952.
6. Kumar R.K. Flammability limits of hydrogen-oxygen-diluted mixtures// *Journ. of Fire Sciences*. 1985. V. 3. P. 245-262.