

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЛОКАЛЬНОГО МАССОПЕРЕНОСА
В ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ С ГОРЕНИЕМ ЭТАНОЛА ЗА ПРЕГРАДОЙ:
ВЛИЯНИЕ ВНЕШНЕЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ**

Б.Ф. Бояршинов, С.Ю. Фёдоров

Институт Теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск, Россия

Проблема взаимодействия турбулентности и горения возникает, если число Дамкёлера $Da \sim 1$. В этом случае, который наиболее важен с практической точки зрения, связь между потоками вещества и скоростью горения устанавливается уравнениями сохранения массы отдельного компонента [1]

$$\frac{\partial(\overline{\rho U Y})_i}{\partial x} + \frac{\partial(\overline{\rho V Y})_i}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\mu}{Sc} \cdot \frac{\partial \bar{Y}}{\partial y} \right)_i + \frac{\partial \bar{J}_i^T}{\partial y} + \bar{W}_i \quad (1)$$

Количество таких уравнений равно количеству компонентов в рассматриваемой газовой смеси. Турбулентный поток вещества \bar{J}^T и источник \bar{W} получить в эксперименте наиболее сложно по сравнению с другими слагаемыми (1), но именно взаимное влияние \bar{J}^T и \bar{W} отражает суть проблемы взаимодействия турбулентности и горения.

В случае, когда $\bar{J}_i^T \neq 0$, численное решение получить нельзя без привлечения дополнительных гипотез. Один из путей решения проблемы взаимодействия турбулентности и горения состоит в прямом определении корреляций $\overline{\rho V' Y'_i} = -\bar{J}_i^T$ и скорости горения \bar{W}_i по одновременным измерениям мгновенных параметров газовой смеси. В работе [2] исследовалось горение водородной струи. За один импульс лазерного излучения получены мгновенные профили температуры и концентрации всех стабильных веществ H_2 , H_2O , O_2 , N_2 в пламени. При использовании последовательности из двух импульсов излучения, отстоящих на 20 микросекунд, получены данные об эволюции локальных параметров газа, сделаны оценки тепловыделения с высоким временным и пространственным разрешением. Метод имеет ограниченное применение, т.к. не включает данных о скоростях \bar{U} , \bar{V} , о пространственных производных, которые необходимы для описания процесса по уравнению (1).

Кроме прямых измерений мгновенных параметров газа в зоне горения существует другая возможность определить турбулентные потоки и источники. Она состоит в использовании большого количества замеров средней скорости, температуры и состава газов. По этим локальным опытным данным определяются производные, входящие в (1), а затем рассчитываются осреднённые значения \bar{J}^T и \bar{W} . По сути, такой подход уже применялся для исследования переноса импульса [3]. Цель настоящей работы состоит в том, чтобы совместно использовать дифференциальные уравнения массопереноса и опытные данные для анализа влияния внешней турбулентности на турбулентные потоки вещества; получить оценки интенсивности источников (стоков) вещества в пограничном слое с испарением и горением этанола за преградой.

Использовались локальные параметры пограничного слоя [4], которые были получены на экспериментальной установке [5], её схема показана на рисунке 1. Все данные соответствуют скорости набегающего потока воздуха $U_0 = 10$ м/с при его степени турбулентности на входе в канал $Tu_0 \sim 1\%$, 8% и 18% , высота ребра-стабилизатора пламени $h = 3$ мм. Вариация параметров ускорения достигалась изменением конфигурации рабочего участка. Верхняя крышка канала отсутствовала в опытах без продольного градиента

давления; рассматривались также данные для канала постоянной высоты 98 мм (98-98) и данные для сужающегося канала (98-70). Пористая нижняя поверхность на ширине 80 мм образована засыпкой из стеклянных шариков диаметром (0.7 ± 0.15) мм, которая была пропитана этанолом. Скорость испарения этанола с каждого элемента нижней стенки самоустанавливалась в соответствии с интенсивностью тепломассообмена между стенкой и зоной горения. Температура набегающего потока $\sim 290 \pm 2$ К, температура испаряющейся поверхности этанола ~ 341 К.

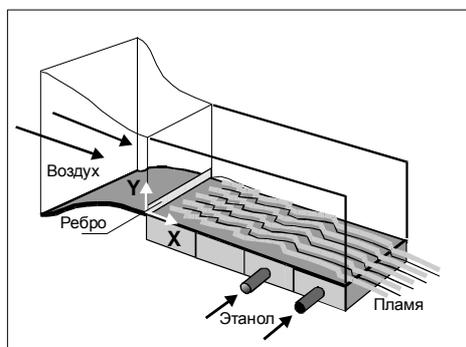


Рис.1. Схема течения в пограничном слое с горением за преградой.

Поле температур и состав газов в пограничном слое исследовались зондовыми методами. Показания термопары из платина-платинородиевой проволоки диаметром 50 микрон корректировались на величину радиационных потерь зонда. Отбор пробы из пограничного слоя с целью изучения состава газовой смеси проводился через кварцевый капилляр диаметром 1 мм с последующим анализом на хроматографе. Для измерения скорости применялся однокомпонентный лазерный доплеровский анемометр (ЛДА). Концентрации радикалов ОН получены методом лазерно-индуцированной флуоресценции (ЛИФ) в режиме насыщения сигнала. Использованы параметры газа для семи сечений $x = 40 - 280$ мм с шагом 40 мм, в каждом из которых они получены для одних и тех же расстояний от стенки (если $y = 0 \div 10$ мм, то с шагом 1 мм, затем $y = 12, 15, 20, 25$ и 30 мм).

Исходные опытные данные [3] по составу газов удовлетворяют условию подобия в распределении атомарных концентраций

$$\left(\frac{Y - Y_w}{Y_0 - Y_w} \right)_N = \left(\frac{\bar{Z} - \bar{Z}_w}{\bar{Z}_0 - \bar{Z}_w} \right)_n$$

которые определяются суммированием по всем веществам $\bar{Z}_n = \sum_i a_{ni} \cdot Y_i$. Корректность

конечных выводов определяется точностью, с которой выполняется соотношения для суммы скоростей образования всех компонентов $\sum_i \bar{W}_i = 0$. Результаты измерений предварительно

были представлены в виде таблиц удобных для дифференцирования. Шаг по продольной координате 2-5 мм, в поперечном направлении 0,2-0,5 мм.

В случае переноса пассивной примеси (азота), когда $\bar{W} = 0$, все слагаемые (1) однозначно определяются. Турбулентный поток азота

$$\bar{J}_N^T = \int_y^{\delta} \frac{\partial \bar{\rho} \bar{U} (Y_0 - \bar{Y})_N}{\partial x} \cdot dy - \bar{\rho} \bar{V} (Y_0 - \bar{Y})_N - \left(\frac{\mu}{Sc} \cdot \frac{\partial \bar{Y}}{\partial y} \right)_N$$

Поперечный поток вещества устанавливался из уравнения неразрывности с учётом измеренной скорости испарения этанола:

$$\rho V(y) = - \int_0^y \frac{\partial \rho U}{\partial x} \cdot dy + J_w$$

На рисунке 2 показаны профили турбулентного потока азота на удалении от стабилизатора пламени $x = 162$ мм при турбулентности воздуха 1% и 18% на входе в сужающийся рабочий участок 98-70. Видно, что в зоне окислителя относительный поток азота $J_N^T / \rho_0 U_0 > 0$, т.е. направлен от стенки, наибольшая его величина достигается выше фронта пламени фронта пламени, где $y/y_f > 1$.

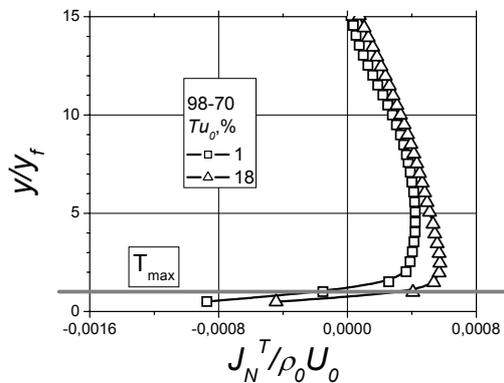


Рис.2. Турбулентные потоки азота в пограничном слое с горением этанола. Горизонтальная линия отмечает положение «фронта пламени»

Если известны потоки азота, можно оценить потоки стабильных веществ (кислород, вода, угарный и углекислый газ), принимая их в виде

$$\bar{J}_i^T = (Y_i / Y_N) \cdot \bar{J}_N^T$$

Далее, потоки вещества использовались для расчёта интенсивности источников (стоков)

$$-\bar{W}_i = \frac{\partial \bar{\rho} \bar{U} (Y_0 - \bar{Y})_i}{\partial x} + \frac{\partial \bar{\rho} \bar{V} (Y_0 - \bar{Y})_i}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\mu}{Sc} \cdot \frac{\partial \bar{Y}}{\partial y} + \bar{J}^T \right)_i$$

Проверка, проведённая с использованием соотношения $\sum_i \bar{W}_i = 0$, показала, что точность

предложенного метода определения скоростей реагирования низкая, на уровне 20%. В пределах такой погрешности можно сделать некоторые качественные выводы о влиянии турбулентности на структуру пограничного слоя с горением.

На рисунке 3 показаны профили скорости образования углекислоты для двух значений турбулентности на входе в канал постоянной высоты 98 мм. Если $Tu = 1\%$ (квадратики), то в профиле отмечается три экстремума, один из которых находится вблизи максимума температуры на координате $y/y_f \sim 1$, т.е. во «фронте пламени» (горизонтальная линия, y_f – координата максимума температуры). Второй экстремум расположен на $y/y_f \sim 1,5$. Он соответствует минимуму скорости горения и совпадает с положением области, где повышенная концентрация радикала ОН (отмечено стрелкой). Третий максимум плавный и находится на удалении $y/y_f \sim 3$. Такая структура пограничного слоя соответствует наличию областей с фронтальным и объёмным горением, между которыми из-за низкой скорости химических реакций накапливаются радикалы ОН. Аналогичное распределение получается для скорости образования воды.

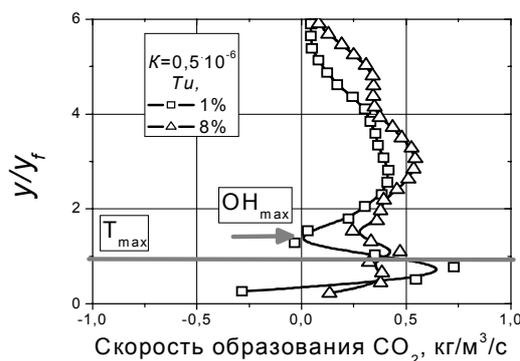


Рис.3. Изменение скорости образования углекислого газа по толщине пограничного слоя при горении этанола в канале постоянной высоты (параметр ускорения $K \sim 0,5 \cdot 10^{-6}$) для турбулентности на входе 1% и 8%. Удаление от ребра 292

В области, где низкая скорость реагирования, концентрация радикалов не связана с кинетикой горения, поэтому она может превышать равновесные значения. Наличие областей со «сверхравновесными» концентрациями ОН, которые смещены относительно положения максимума температуры, отмечалось в работе [6]. В статье [7] при анализе теплообмена в экспериментах с различными видами диффузионного пламени было показано наличие областей, в которых нет тепловыделения. В них концентрируются радикалы ОН и СН. В настоящей работе наличие областей с низкой скоростью горения подтверждается на основании данных по массопереносу.

Подобная структура пограничного слоя, в котором одновременно представлены разные виды горения, разрушается при повышении турбулентности газового потока. Из рисунка 3 видно, что при повышении турбулентности до 8% (треугольники) «фронт пламени» на координате $y/y_f \sim 1$ становится размытым, увеличивается область с объёмным горением. Таким образом, изменением турбулентности набегающего потока можно изменить скорость горения и соотношение между размерами областей с фронтальным и объёмным реагированием в пограничном слое с горением за преградой.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований проект № 09-03-471, а также НШ-4349.2010.8.

Обозначения

a_{ni} – массовая доля n -го элемента в i -м веществе; D – коэффициент диффузии, ($\text{м}^2/\text{с}$); Da – число Дамкёлера; h – высота преграды, м; J – поток вещества, ($\text{кг}/\text{с}/\text{м}^2$); M – молекулярная масса; Sc – число Шмидта; T – температура, К; Tu – интенсивность турбулентности, $\sqrt{(\overline{U'})^2}/U_0$; U, V – продольная и поперечная компоненты скорости, м/с; \overline{W} – источник (сток) вещества, ($\text{кг}/\text{с}/\text{м}^3$); x, y – продольная и поперечная координаты, м; Y_i – массовая доля i -компонента; \overline{Z} – массовая доля элемента; μ – динамическая вязкость, $\text{кг}/\text{м}/\text{с}$; ν – кинематическая вязкость, $\text{м}^2/\text{с}$; ρ – плотность, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Литература

1. Леонтьев А.И. Теория тепломассообмена /Исаев С.И., Кожинов И.А., Кофанов и др; Под ред. Леонтьева А.И. – М.: Высш. Школа, 1979. – 495с.

2. Brockinke A., Naufe S., Kohse-Hoinghaus K. Structural Properties of Lifted Hydrogen Jet Flames Measured by Laser Spectroscopic Techniques // Combustion and Flame, 2000, Vol.121, P. 367-377.

3. Boyarshinov B. F., Titkov V. I., Fedorov S. Yu. Momentum transfer in the boundary layer when there is acceleration and combustion of ethanol as it evaporates behind a barrier // Combustion and Flame, 2010, Vol.157, P.1496-1509.

4. База данных по характеристикам турбулентного пограничного слоя с химическими и фазовыми превращениями

http://www.itp.nsc.ru/Laboratory/LAB_2_1/Flame/First%20page.html

5. Волчков Э.П., Терехов В.В., Фёдоров С.Ю., Бояршинов Б.Ф. Пограничный слой с горением на проницаемой поверхности / с.63-90 в кн. Законы горения / Под общ. ред. Ю.В.Полежаева. М.: Энергомаш, 2006. – 352с.

6. Drake M.C., Pitz R.W., Lapp M., Fenimore C.P., Lucht R.P., Sweeney D.W., Laurendeau N.M. Measurements of superequilibrium hydroxyl concentrations in turbulent nonpremixed flames using saturated fluorescence // 20-th Int. Symp. on Combust., the Combustion Institute, Pittsburgh: 1984. P. 327 - 335.

7. Бояршинов Б.Ф. Влияния переноса тепла на распределение радикалов OH и CH в пограничном слое с горением // ФГВ, 2008, т.44, №6, с.3-11.