

**АКАДЕМИЯ НАУК СССР СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
ИНСТИТУТ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ И ПРИКЛАДНОЙ
МЕХАНИКИ**

СТРУКТУРА ГАЗОФАЗНЫХ ПЛАМЕН

**(материалы Международного семинара по структуре
газофазных пламен, Новосибирск, июль, 27-31, 1986г.)**

ЧАСТЬ II

**Под редакцией
профессора В.К.Баева**

Новосибирск, 1988г.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ РЕАГИРУЮЩЕГО ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ ВЕЛИЗИ ПОВЕРХНОСТИ ЖИДКОГО ГОРЮЧЕГО

Б.Ф.Бояршинов, Э.П.Волчков, В.И.Терехов

Механизм горения твердых, жидких и газообразных топлив, как правило, включает в себя вдув в пограничный слой веществ, реагирующих в газовой фазе с набегающим потоком, содержащим окислитель. Существует целый ряд теоретических работ, связанных с изучением структуры реагирующего турбулентного пограничного слоя. Эти работы основаны на численном решении уравнений переноса с использованием различных моделей турбулентности, требующих привлечения эмпирических констант. Однако количество систематических экспериментальных исследований, посвященных турбулентным реагирующим слоям, весьма ограничено и поэтому остается открытым вопрос о правильности учета специфики влияния горения на процессы переноса импульса, тепла и вещества.

При горении в газовом потоке могут развиваться высокие температуры и их градиенты, устанавливается довольно сложное пространственное распределение веществ. Это приводит к определенным трудностям при измерении параметров пограничного слоя с химическими реакциями. Кроме того, поскольку процессы переноса тепла, вещества и импульса взаимно связаны, необходимым является проведение комплексных измерений, включающих в себя получение данных о распределении температур, скоростей, концентраций веществ, а также тепловых и массовых потоков. Большой интерес представляет исследование пульсационной структуры реагирующих пограничных слоев.

Целью настоящей работы является экспериментальное исследо-

вание пограничного слоя с химическими превращениями и анализ влияния фронта горения на его структуру.

Экспериментальный стенд и методика измерений

В опытах моделировался двумерный пограничный слой на плоской проницаемой поверхности при диффузионном горении испаряющегося спирта в потоке воздуха. Экспериментальная установка представляла собой аэродинамическую трубу с прямоугольной рабочей частью сечением $100 \times 100 \text{ мм}^2$ и длиной 700 мм, рис.1. Нижняя поверхность измерительного участка была образована четырьмя пористыми пластинами I размерами $80 \times 80 \text{ мм}^2$ каждая. Боковые стенки выполнены из оптически прозрачных кварцевых пластин. Для исключения продольного градиента давления верхняя крышка отсутствовала. Поперечный поток вещества создавался при испарении спирта с поверхности пористых пластин, которые оставались влажными в течение всего времени проведения экспериментов. Уровень горючего в пластинах совпадал с их поверхностью, обращенной к воздушному потоку и сохранялся постоянным, благодаря действию капиллярных сил. Это значительно упрощает контроль за режимом работы установки и повышает точность измерения расходов реагирующего вещества. После зажигания устанавливается самоподдерживающийся режим горения, когда расход испаряющегося спирта определяется интенсивностью теплоподвода от зоны горения к поверхности жидкости.

Для стабилизации пламени использовался уступ 2 (рис.1) высотой 2,5 мм, расположенный перед первой пористой пластиной. Предварительные испытания установки в изотермических условиях при наличии и отсутствии вдува показали, что действие стабилизатора сводится к смещению эффективного начала динамического пограничного слоя вверх по потоку и не оказывает влияния на закон переноса импульса и вещества. Однако наличие шероховатости у пористых пластин вызывает отклонение от "стандартного" закона сопротивления для обтекания гладкой поверхности. В экспериментах было обнаружено, что влияние шероховатости исчезает при вдувах $\bar{J} = \rho_w U_w / \rho_\infty W_\infty \geq 0,001$. В опытах по исследованию испарения жидкостей с поверхности пористых пластин установлено, что шероховатость их поверхности и наличие фазового перехода не оказывают влияния на законы тепло- и массообмена [1]. Таким об-

разом, течение при отсутствии горения может быть описано известными зависимостями для двумерного пограничного слоя с учетом наличия предвключенного участка, длина которого определялась в каждом конкретном случае экстраполяцией в ноль интегральных толщин пограничного слоя.

Опыты с горением проводились при скоростях набегающего потока 10 ± 20 м/с. В изотермических условиях это соответствует существованию по всей длине измерительного участка турбулентного пограничного слоя. Были проведены измерения профилей средних значений температур, скоростей и состава продуктов сгорания для расстояний от стабилизатора $X = 40, 80, 120, 160, 200, 240$ и 280 мм. Кроме этого контролировались расходы горючего через пористые пластины и температура их поверхности.

Измерение профилей осредненных температур осуществлялось с использованием методики, исключающей радиационные потери зонда. Суть её заключается в том, что измеряется температура платиновой проволоки, помещенной в поток, которая дополнительно подогревается электрическим током. Величина подогрева выбирается так, что исключается конвективный перенос тепла между проволокой и газовым потоком, то есть достигается равенство температур проволоки и газа [2].

Пульсации температуры в частотном диапазоне ниже 200с^{-1} измерялись платино-платинородиевой микротермопарой диаметром $0,05$ мм. Полученный сигнал обрабатывался с помощью многоканального анализатора спектра.

Изучение состава продуктов сгорания осуществлялось отбором пробы газа из пограничного слоя с последующим анализом её на газовом хроматографе "ЦВЕТ-102". Отбор пробы проводился непрерывно прокачкой через кран-дозатор хроматографа, анализ взятой пробы — циклический. Кварцевый зонд для отбора проб диаметром 2 мм позволял контролировать скорость отбора пробы, поскольку его конструкция обеспечивала возможность измерения статического давления за его входным отверстием. При равенстве статического давления за отверстием и в точке отбора скорость газа в отверстии соответствовала скорости в пограничном слое. Тем самым выполнялось условие изокINETичности отбора пробы. Поскольку на поверхности пористых пластин происходит испарение горючего, то концентрации веществ на стенке также возможно определить, исхо-

для из измеренных температур поверхности пластин и состава газов вблизи стенки с использованием кривой насыщения. Для определения состава газов у испаряющейся поверхности отбор пробы осуществлялся с помощью зонда, расположенного в плоскости пористых пластин. Зонд, кран-дозатор и магистраль, связывающая их, поддерживались при температуре $\sim 90^\circ\text{C}$ для предотвращения потери конденсирующихся продуктов сгорания спирта. При проведении анализа введенной пробы регистрировались семь веществ таких как $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$, $\text{C}_2\text{H}_4\text{O}$, H_2O , CO_2 , N_2 , CO и O_2 . Разделение смеси на спирт, уксусный альдегид, воду и углекислый газ с последующей их регистрацией проводились на колонке с сорбентом Полисорб-1. Далее эти вещества замораживались в холодильнике при температуре жидкого азота, а оставшиеся компоненты разделялись и регистрировались после прохождения колонки с молекулярными ситами. Тарировка хроматографа по спирту и воде осуществлялась введением проб насыщенного пара этих жидкостей; тарировка по остальным веществам проводилась введением различных по массе чистых газов.

Профили продольной компоненты скорости измерялись с помощью лазерного доплеровского анемометра, собранного по дифференциальной схеме. Источником излучения служил He-Ne лазер мощностью 15 мВт с длиной волны 0,6328 мкм, который размещался на единой платформе вместе с оптической системой. Платформа с помощью координатного устройства перемещалась в двух направлениях относительно пограничного слоя. В качестве рассеивающих центров применялись частицы кварцевого песка с размерами ~ 1 мкм. Частицы вводились в пограничный слой через щель в начальном сечении рабочего канала. Обработка доплеровского сигнала производилась с помощью следящего фильтра, разработанного в ИТФ СО АН СССР [3]. Для измерений среднеквадратичных пульсаций продольной компоненты скорости сигнал со следящего фильтра поступал на вольтметр эффективных значений; спектральный анализ проводился с помощью многоканального анализатора спектра. Количество частиц, пролетающих измерительный объем лазерного доплеровского анемометра, контролировалось и составляло $\sim 10^3 \text{ с}^{-1}$. Методика измерений ЛДА была апробирована при измерениях средней скорости в изотермическом пограничном слое без вдува. Полученные при этом профили совпадают с измерениями,

проведёнными трубкой Пито.

Обсуждение результатов измерений

Наличие зоны тепловыделения в пограничном слое приводит к появлению ряда особенностей, которые наиболее ярко проявляются в изменении пульсационной структуры. Так, например, степень турбулентности, определенная по отношению среднеквадратичной пульсации продольной компоненты скорости к её значению в ядре потока снижается в области тепловыделения, причем её уровень ниже, чем в "стандартном" пограничном слое без вдува и горения. Это видно из сравнения измерений авторов с опытами Клебанова, представленными сплошной линией на рис.2. Эффект подавления турбулентности в высокоэнтальпийных газовых потоках, обусловленный возрастанием вязкости в области высоких температур, наблюдался ранее в факелах и неизотермических струях [4]. В зоне тепловыделения снижается также величина относительной пульсации температуры $\sqrt{T'^2}/(T - T_\infty)$. Однако, как показали измерения в низкочастотной части спектра, проведённые с помощью термопары, амплитуды пульсаций температуры во внешней части пограничного слоя весьма значительны и могут достигать средних значений температуры. Сочетание подавления турбулентности и наличия тепловых неоднородностей, по-видимому, обусловлено переносом из зоны тепловыделения высокотемпературных объемов газа, которые движутся со скоростями, близкими к локальной скорости в пограничном слое.

Максимальное значение температуры, которое имело место в опытах, составляет величину $T_f = 1720$ К. Это существенно ниже, чем в опытах [5], которые были проведены при более низких скоростях воздушного потока. В реагирующем пограничном слое температуры и концентрации веществ связаны между собой. Поэтому изменение в профиле температур является следствием изменения в распределении веществ. На рис.3а показаны типичные профили концентраций, взятые из работы [5], рис.3б представляет распределение концентраций, характерное для скорости обтекания $W_\infty = 10$ м/с. Пунктирная линия-координата зоны максимальных температур. Из сравнения этих профилей видно, что изменение режима течения приводит к значительной перестройке рас-

пределения веществ. В обоих случаях отмечается стадийность протекания химического реагирования, что является характерной чертой диффузионного горения углеводородов [6]. В обоих случаях между стенкой и зоной высоких температур появляются промежуточные продукты реагирования: уксусный альдегид C_2H_4O и угарный газ CO . С ростом скорости обтекания (рис.3) наблюдается несовпадение координат максимальных концентраций воды и углекислого газа между собой и смещение их относительно координат максимума температуры. Это также может быть объяснено стадийностью химических превращений. Однако, наиболее вероятной причиной могут оказаться эффекты, связанные с осреднением состава газа в процессе его отбора из потока, в котором имеют место значительные пульсации концентраций веществ.

На основании полученных данных по профилям скоростей, температур и состава представляется возможным проанализировать структуру пограничного слоя с точки зрения подобия процессов переноса импульса, тепла и вещества. Для реагирующего пограничного слоя уравнение энергии, движения и диффузии становятся подобными, если числа Прандтля, Льюиса и Шмидта равны между собой, $Pr = Le = Sc = 1$, а сами уравнения рассматриваются для безразмерных скоростей, обобщенных концентраций элементов и полных энтальпий. Тогда тройная аналогия записывается в виде [7]

$$\omega = \tilde{h} = \tilde{K}.$$

Здесь $\omega = W/W_\infty$ - относительная скорость,
 $\tilde{h} = (\bar{h} - \bar{h}_w)/(\bar{h}_\infty - \bar{h}_w)$ - безразмерная полная энтальпия,
 $\tilde{K} = (\bar{K}_j - \bar{K}_{jw})/(\bar{K}_{j\infty} - \bar{K}_{jw})$ - безразмерная концентрация,
 j -го химического элемента. Концентрация j -го элемента $\bar{K}_j$ определяется суммированием концентраций этого элемента по всем i - веществам

$$\bar{K}_j = \sum r_{ji} \cdot K_i,$$

K_i - весовая концентрация вещества в смеси,
 r_{ji} - массовая доля j -го элемента в i -ом веществе.
 Полная энтальпия смеси равна:

$$\bar{h} = \sum_i \left(\int_{298}^T c_{p_i} dT + \Delta H_{298}^{\circ} \right) \cdot K_i ,$$

где ΔH_{298}° — стандартная энтальпия образования сложного вещества из простых.

Следует отметить, что для условий проведённых экспериментов, когда использовался стабилизатор пламени, тепловой и диффузионный пограничные слои начинают развиваться внутри динамического. Это приводит к заметной перестройке течения по длине пограничного слоя. Однако для сечений, удалённых от стабилизатора, наблюдается близкое совпадение безразмерных профилей скорости полной энтальпии и концентрации элементов (рис.4). Здесь проведено сравнение профилей в сечении $x = 280$ мм, расстояние от стенки отнесено к соответствующим толщинам потери импульса δ^{**} , полной энтальпии δ_h^{**} и вещества δ_g^{**} .

Значение диффузионного и теплового чисел Стентона в эксперименте определялось как

$$St_g = \frac{\rho_w u_w}{\rho_{\infty} w_{\infty} \cdot b_1} = \bar{J} \frac{\bar{K}' - \bar{K}_w}{\bar{K}_w - \bar{K}_{\infty}} ;$$

$$St_h = \frac{q_w}{\rho_{\infty} w_{\infty} (\bar{h}_{\infty} - \bar{h}_w)} = \bar{J} \frac{r}{(\bar{h}_{\infty} - \bar{h}_w)} ,$$

где $\bar{K}'$ — концентрация элемента во вдуваемом веществе;

r — теплота парообразования спирта; $(\bar{h}_{\infty} - \bar{h}_w)$ — разность полных энтальпий в ядре потока и на стенке. Располагая этими значениями, можно профиль безразмерной полной энтальпии, например, представить в универсальных координатах $\varphi = \bar{h} / \sqrt{St_h}$ и $\eta = w_{\infty} y \sqrt{St_h} / \nu_{\infty}$. Такая обработка наглядно показывает соотношение между вязким подслоем и турбулентным ядром в реагирующем пограничном слое. Из рисунка 5 видно, что зона горения существенно образом трансформирует профиль безразмерной полной энтальпии, приводя к увеличению вязкого подслоя. Профиль безразмерной концентрации элемента имеет такой же вид. По-видимо-

му, ламинаризация течения в пристенной части пограничного слоя также вызвана подавлением турбулентности в зоне тепловыделения, связанным с возрастанием вязкости при высоких температурах.

Таким образом, на основании проведенных исследований установлено наличие ряда особенностей в структуре реагирующего пограничного слоя. К ним относится ламинаризация пристенной части течения, когда толщина вязкого подслоя может достигать 10-20% толщины пограничного слоя, а также несовпадение максимумов температуры и концентраций продуктов сгорания, подавление турбулентности в зоне тепловыделения и существование значительных пульсаций температуры во внешней части пограничного слоя. Тем не менее, подобие процессов переноса тепла, импульса и вещества, которое выражается подобием соответствующих безразмерных профилей, сохраняется.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бояршинов Б.Ф., Волчков Э.П., Терехов В.И. Конвективный тепло-массообмен при испарении жидкости в газовый поток//Известия СО АН СССР.-1985.-№16. Вып.3.-С.13-22.
2. Физические измерения в газовой динамике и при горении.-М.: ИЛ, 1957.-484С.
3. Титков В.И., Томсонс Я.Я., Данилов Н.С. Лазерный доплеровский измеритель скорости (ЛДИС)//Экспериментальные методы и аппаратура для исследования турбулентности: Материалы III Всесоюзного совещания, октябрь 1979.-Новосибирск, 1980.-С. 36-40.
4. Устименко Б.П., Змейков В.Н., Шишкин А.А. Термоанемометрические методы исследования турбулентности в газовых потоках и факелах.-Алма-Ата: Наука, 1983.-180 С.
5. Бояршинов Б.Ф., Волчков Э.П., Терехов В.И., Щутов С.А. Турбулентный пограничный слой со вдувом реагирующих веществ//Физика горения и взрыва.-1981.-№6.-С.21-28.
6. Мальцев В.М., Мальцев М.И., Кашпоров Л.Я. Основные характеристики горения.-М.:Химия, 1977.-320 С.
7. Кутателадзе С.С., Леонтьев А.И. Теплообмен и трение в турбулентном пограничном слое.-М.:Энергия, 1972.- 344 С.

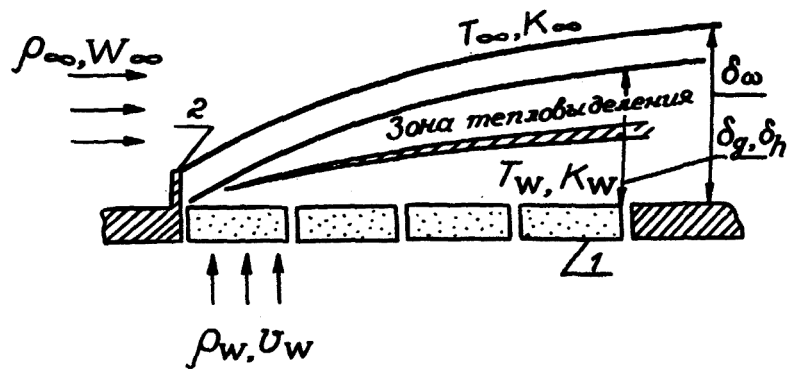


Рис.1. Схема экспериментальной установки

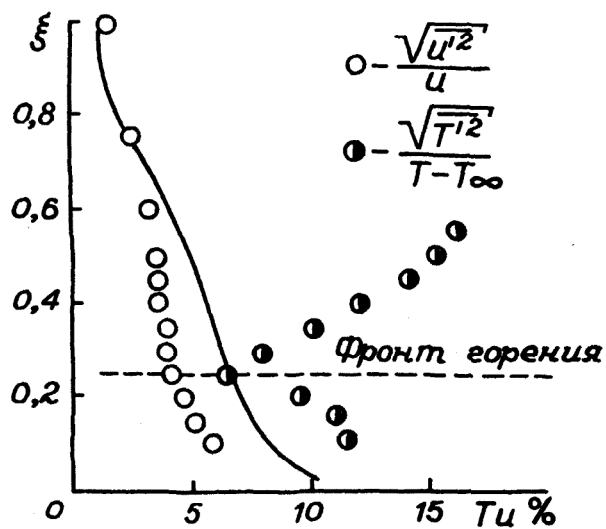


Рис.2. Пульсационная структура пограничного слоя при горении

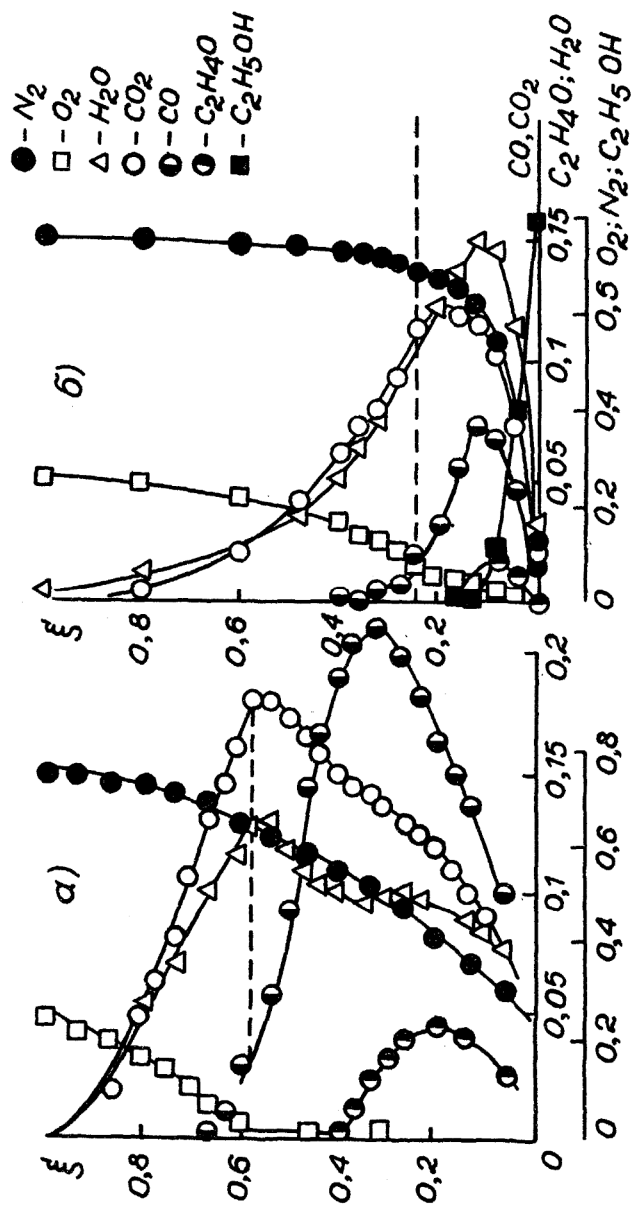


Рис.3. Распределение веществ в пограничном слое с горением

а) данные работы [5],

б) измерения при $W_{\infty} = 10$ м/с, $x = 200$ мм.

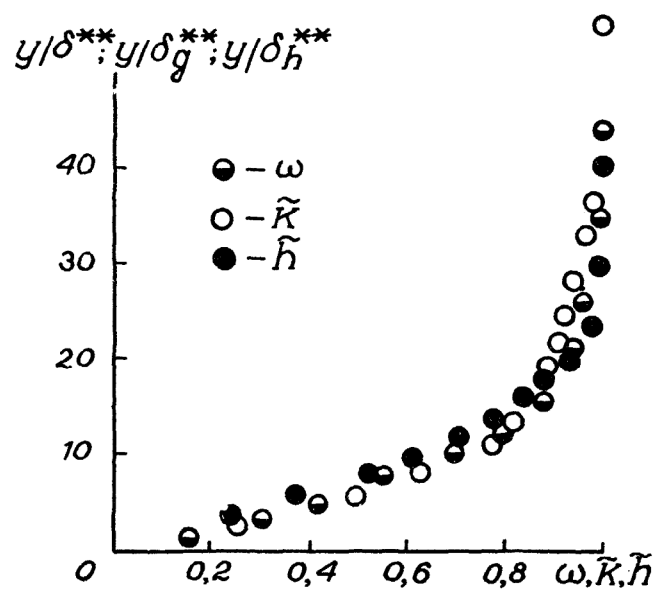


Рис.4. Сопоставление безразмерных профилей скорости, концентрации элемента и безразмерной полной энтальпии при горении

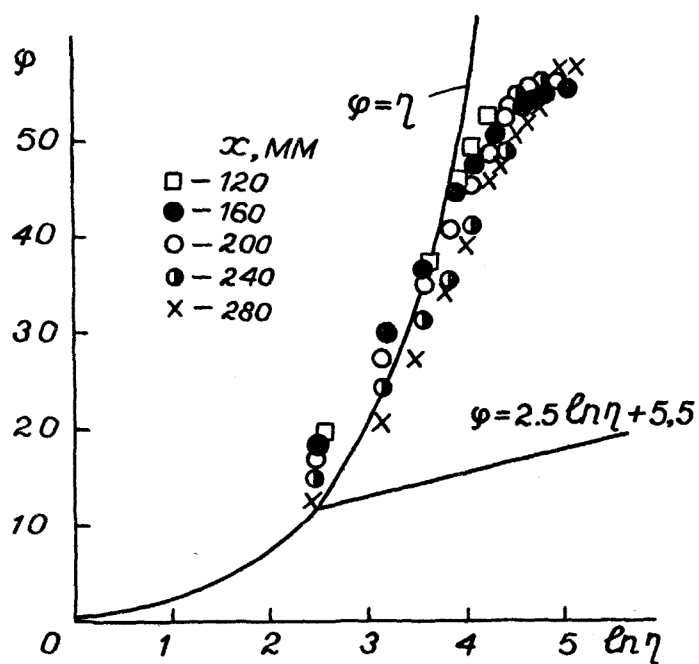


Рис.5. Профили безразмерной полной энтальпии в универсальных координатах