

ИЗУЧЕНИЕ СТРУКТУРЫ ДИФФУЗИОННОГО ПЛАМЕНИ $\text{CH}_4/\text{N}_2\text{—O}_2/\text{N}_2$ НА ВСТРЕЧНЫХ ПОТОКАХ С ПОМОЩЬЮ МОЛЕКУЛЯРНО-ПУЧКОВОЙ И МИКРОЗОНДОВОЙ МАСС-СПЕКТРОМЕТРИИ

Д. А. Князьков, О. П. Коробейничев, А. Г. Шмаков

Институт химической кинетики и горения СО РАН, 630090 Новосибирск, korobein@kinetics.nsc.ru

На примере пламени $\text{CH}_4/\text{N}_2\text{—O}_2/\text{N}_2$ показана возможность применения молекулярно-пучковой масс-спектрометрии (МППМС) для изучения структуры пламени на встречных потоках. Изучена тепловая структура пламени, а также измерены распределения концентраций CH_4 , O_2 и CO_2 с помощью микрозондовой методики и МППМС. Сопоставлены результаты измерений, проведенных обоими методами. Методом МППМС исследовано распределение концентрации гидроксила в пламени. Рассчитаны и сопоставлены с экспериментом профили концентраций веществ и температуры по оси горелки.

Ключевые слова: структура пламени, молекулярно-пучковая масс-спектрометрия, пламя на встречных потоках.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из наиболее точных инструментов для получения информации о химической структуре пламени является молекулярно-пучковая масс-спектрометрия (МППМС). Этот метод позволяет детектировать в пламени кроме стабильных и лабильные частицы, включая атомы и свободные радикалы, а также измерять их концентрации и пространственное распределение. Сопоставление данных эксперимента и моделирования по структуре пламени позволяет получить информацию о механизме и кинетике важнейших химических реакций в пламени. Метод МППМС получил достаточно широкое распространение в исследованиях химической структуры пламен, стабилизированных на плоской горелке, а также пламен конденсированных систем. Однако ранее этот метод не применялся для исследования структуры диффузионных пламен на встречных потоках, интерес к которым в последнее время значительно возрос. Такие пламена используются как для решения технологических задач (например, в микроэлектронике, нанотехнологиях для получения новых материалов), так и для фундаментальных исследований в области горения (пределы распространения пламен и их ингибирование, кинетика и механизмы реакций в пламенах). До сих пор для исследования структуры пламен на встречных потоках применялась микрозондовая масс-спектрометрия (см., например, [1, 2]), позволяющая детекти-

ровать лишь стабильные вещества, внося при этом ошибки в определение концентраций веществ за счет их частичного разложения или реагирования на внутренних стенках микрозонда, нагретого до высокой температуры. Для детектирования активных частиц (атомов и радикалов), а также трудных для обычного масс-спектрометрического анализа, но часто очень важных веществ, таких как пары металлов, кластеры, оксиды и кислоты фосфора, наночастицы, необходимо использовать молекулярно-пучковую масс-спектрометрию. Конечно, для регистрации некоторых радикалов в пламени на встречных потоках применяются спектроскопические методы, такие, например, как метод лазерной индуцированной флуоресценции (для детектирования, главным образом, гидроксила и NO [3–6]). Но при решении многих задач, например, при моделировании структуры пламени, требуется знание распределения концентраций большинства (или всех) веществ и других радикалов, которые спектроскопическими методами не регистрируются.

Целью настоящей работы является исследование возможности применения методики МППМС для изучения структуры диффузионного пламени, стабилизированного на встречных потоках окислителя (O_2/N_2) и горючего (CH_4/N_2). Для этого изучалась тепловая структура пламени, измерялись распределения концентраций стабильных веществ, таких как CH_4 , O_2 и CO_2 , с помощью микрозондовой масс-спектрометрической методики и

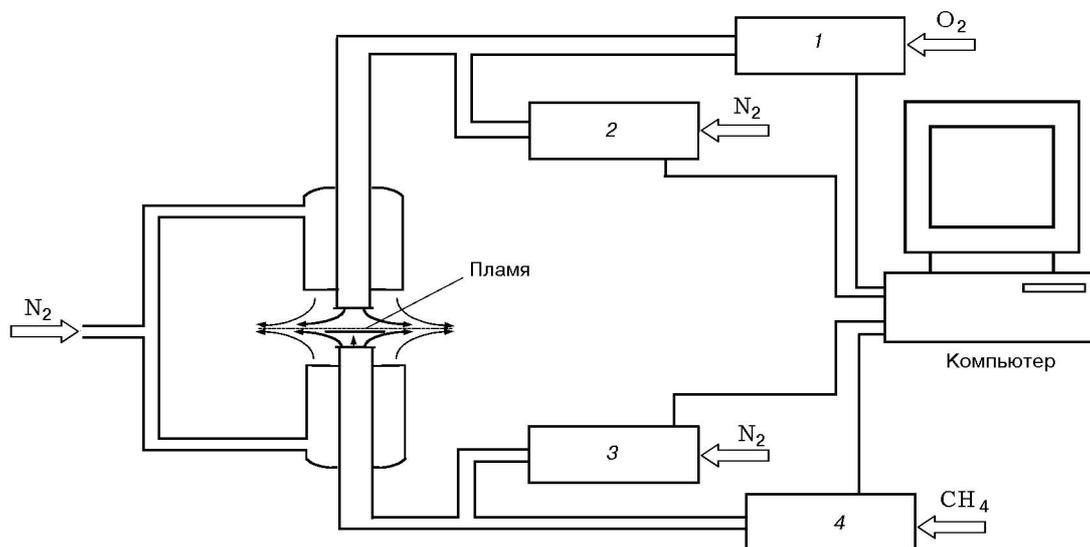


Рис. 1. Схема установки:

1–4 — контроллеры расхода газов

МПМС, проводилось их сопоставление. Методом МПМС измерялись профили концентрации гидроксила. Кроме того, численно рассчитывались и сопоставлялись с экспериментом профили концентраций веществ и температуры по оси горелки.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Диффузионное пламя $\text{CH}_4/\text{N}_2\text{—O}_2/\text{N}_2$ на встречных потоках окислителя и горючего стабилизировалось при атмосферном давлении на горелке Поттера, оснащенной системой подачи газов (рис. 1). По внутренним трубкам с одной стороны подается горючее, с другой — окислитель. В пространство между внутренними и внешними трубками подается инертный газ (азот). Последний необходим для того, чтобы предотвратить подмешивание атмосферного воздуха в потоки горючего и окислителя. Скорости газа на выходе из внешних и внутренних трубок близки. Внутренний диаметр сопел горелки составлял 6.8 мм, расстояние между ними — 6.7 мм. Объемный состав смеси: окислитель — 40 % O_2 + 60 % N_2 , горючее — 20 % CH_4 + 80 % N_2 . Объемный расход газов задавался и регулировался при помощи цифровых регуляторов потоков фирмы MKS Instruments, управляемых компьютером. Каждый контроллер предварительно был откалиброван. Погрешность задания расходов потоков составляла не более 1 %.

Растяжение пламени на встречных пото-

ках характеризуется обычно градиентом аксиальной скорости потока окислителя вблизи плоскости стагнации (плоскости столкновения потоков) [7]. Для точного определения градиента скорости необходимы экспериментальные данные по распределению аксиальной скорости потоков вдоль оси горелки при помощи лазерного доплеровского измерителя скорости [7, 8]. В работе [9] в случае «поршневого» течения газа было получено выражение для градиента скорости вблизи плоскости стагнации, которое позволяет обойтись без прямого измерения скоростей:

$$a = \frac{2V_{ox}}{L} \left(1 + \frac{V_{fuel}}{V_{ox}} \sqrt{\frac{\rho_{fuel}}{\rho_{ox}}} \right), \quad (1)$$

где V_{ox} , V_{fuel} — средние линейные скорости окислителя и горючего на выходе из трубок горелки, L — расстояние между срезами трубок горелки, ρ_{ox} , ρ_{fuel} — плотности окислителя и горючего. Под «поршневым» течением подразумевается отсутствие радиальной составляющей скорости везде, за исключением области вблизи плоскости стагнации. Значение градиента скорости, оцененное по формуле (1), для исследуемого в этой работе пламени составляло 358 с^{-1} . Такие условия были подобраны экспериментально для обеспечения стабильности пламени — при более сильном растяжении пламени тепловые и гидродинамические возмущения термопары и пробоотборника становятся существенными и приводят к искажению или погасанию пламени.

Химическую структуру пламени изучали с помощью методов микрозондового и молекулярно-пучкового отбора пробы с последующим масс-спектрометрическим анализом. Метод молекулярно-пучковой масс-спектрометрии детально описан в [10].

В экспериментах с микрозондовым пробоотбором горелка размещалась вертикально, т. е. плоскость пламени располагалась горизонтально. При отборе пробы «звуковым» зондом (при использовании методики МПМС) горелка устанавливалась горизонтально, так как конструкция системы МПМС [10] не позволяла располагать ее вертикально. Положение пламени в горизонтальной плоскости более правильно, чем в вертикальной, поскольку в последнем случае конвективные потоки могут нарушить симметричность диска пламени, что, вероятно, приведет к искажению структуры пламени. Однако визуально установлено, что искажения пламени в вертикальной плоскости за счет конвекции незначительны. Поэтому предполагается, что результаты, полученные при вертикальном и горизонтальном расположении пламени, должны совпадать. В пользу этого предположения свидетельствует совпадение профилей температур вдоль оси горелки, измеренных микротермопарами при вертикальном и горизонтальном расположении горелки.

Параметры кварцевого микрозонда: диаметр отверстия 40 мкм, толщина стенок около отверстия 80 мкм, внутренний угол отверстия 20°. Микрозонд закреплялся горизонтально на сканирующем механизме, который передвигал зонд в вертикальном направлении при помощи микрометрического винта с точностью до 0.01 мм. Конструкция механизма позволяла проводить отбор пробы не только по оси горелки, но и параллельно оси на заданном расстоянии от нее. Микрозонд был соединен с системой напуска квадрупольного масс-спектрометра MS 7302, с помощью которого проводился анализ пробы. Выбор этой методики обусловлен тем, что микрозонд вносит слабые аэродинамические и тепловые возмущения в пламя. Однако его использование делает невозможной регистрацию радикалов в пламени, а также других важных веществ, которые могут разлагаться или реагировать на внутренних стенках зонда, нагретых до высокой температуры.

Для регистрации лабильных и стабильных

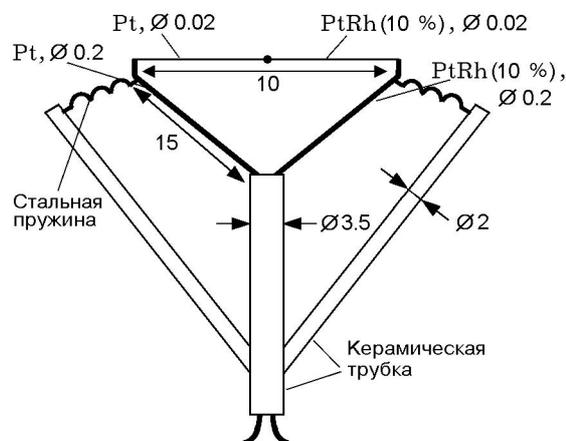


Рис. 2. Узел крепления термопары

компонентов в пламени применялась методика МПМС. Внутренний угол «звукового» зонда составлял 40°, диаметр отверстия 80 мкм, толщина стенок около отверстия 80 мкм.

Для определения концентрации C_i идентифицированных веществ в пламени, таких как CH_4 , O_2 , CO_2 , OH , по их интенсивностям пиков I_i использовалось соотношение

$$C_i = I_i C_{i,c} / I_{i,c}, \quad (2)$$

где $I_{i,c}$ и $C_{i,c}$ — интенсивность пика и концентрация i -го вещества в приготовленной для калибровки смеси. Калибровочные коэффициенты $C_{i,c}$ для CH_4 и O_2 определялись с использованием исходных смесей с горючим (для CH_4) и с окислителем (для O_2). Поскольку мы не ставили себе целью точное определение абсолютных значений концентраций гидроксила и CO_2 , калибровка по ним проводилась по значению их максимальных концентраций, полученных из рассчитанных профилей концентраций в пламени.

Профили температуры пламени вдоль оси горелки и на заданном расстоянии от нее измерялись с помощью Pt-PtRh (10 %) термопары П-типа (диаметр 20 мкм). Способ изготовления термопар аналогичен описанному в [10] и заключается в следующем. Отрезки платиновой и платинородиевой проволоки диаметром 0.02 мм и длиной около 15 мм сваривали друг с другом методом точечной сварки под микроскопом. Готовую термопару приваривали к узлу крепления термопары, показанному на рис. 2. Пружины, входящие в конструкцию узла крепления термопары, слегка растягива-

ют термопару и препятствуют ее деформации при нагреве и охлаждении во время эксперимента. Для предотвращения каталитического эффекта на поверхности термопары последнюю покрывали тонким слоем SiO_2 . Диаметр термопары с покрытием составлял 50 мкм. Общая длина плеч термопары, равная 1 см, была больше диаметра внутренних трубок горелки, что позволяло минимизировать аэродинамические возмущения пламени, вносимые термопарой. При проведении измерений плечи термопары располагались перпендикулярно оси горелки, а спай — на ее оси.

МОДЕЛИРОВАНИЕ

Для моделирования структуры пламени использовалась программа OPPDIF [11] из программного пакета Chemkin [12]. С ее помощью были рассчитаны профили температуры и концентраций веществ в пламени вдоль оси горелки.

Во входном файле программы OPPDIF задавались параметры, определяющие граничные условия на срезах сопел горелки: скорости потоков окислителя V_{ox} и горючего V_{fuel} , температура, составы потоков окислителя и горючего, а также значения градиентов радиальных составляющих скоростей потоков окислителя A_{ox} и горючего A_{fuel} .

Расчеты проводились для двух типов течений и граничных условий для поля скоростей потоков. В одном случае рассматривалось «поршневое» течение и предполагалось, что на выходе из трубок горелки радиальная составляющая скорости равна нулю, что соответствует условию $A_{ox} = A_{fuel} = 0$ (граничные условия, соответствующие «поршневому» течению газов), осевая составляющая скоростей не зависит от радиуса. В этом случае растяжение сосредоточено вблизи плоскости стагнации. Значения V_{ox} и V_{fuel} определялись как отношения объемных расходов окислителя и топлива к площади поперечного сечения трубок горелки.

В другом случае рассматривалось потенциальное течение и предполагалось пуазейлевское распределение по радиусу аксиальной составляющей скорости газов на выходе из трубок горелки (параболический профиль скорости). Растяжение между торцом трубки и плоскостью стагнации считалось постоянным. Растяжение (градиент аксиальной составляющей

скорости окислителя вдоль оси горелки) определяли по формуле, представленной в [7]:

$$a = \frac{2V_{ox}}{L} \left(1 + \frac{V_{fuel}^2 \rho_{fuel}}{V_{ox}^2 \rho_{ox}} \right),$$

где $2V_{ox}$ — скорость окислителя на оси. Ввиду того, что градиент радиальной скорости в два раза меньше градиента аксиальной скорости [13], величину A_{ox} определили как $a/2$. Аналогично определен градиент радиальной скорости горючего A_{fuel} . Значения V_{ox} и V_{fuel} , так же как в [5], задавали в два раза большими по сравнению с теми, что получаются осреднением по сечению трубок. Авторы [5] путем такого увеличения значений V_{ox} и V_{fuel} добились согласия рассчитанного и экспериментального профилей концентрации радикалов OH в пламени. Они объяснили это тем, что на оси горелки линейная скорость в два раза больше средней линейной скорости для пуазейлевского течения.

Два вышеприведенных способа задания граничных условий для поля скоростей — это идеализированные случаи. Экспериментально обнаружено, что реальные распределения скоростей не соответствуют в точности ни одному из этих случаев, а лежат между ними [8]. Поэтому в настоящей работе моделирование структуры пламени выполнено для обоих видов граничных условий.

При моделировании структуры метанового пламени на встречных потоках использовался механизм окисления метана GRI 3.0 [14]. Ранее он был неоднократно проверен на плоских одномерных метановоздушных пламенах путем сопоставления результатов расчетов и экспериментов по структуре пламени и скорости его распространения.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Полную информацию о химическом составе и химической структуре пламени можно получить, используя МПМС. В этом ее преимущество перед микрозондовой масс-спектрометрией. Как известно, при изучении пламен с применением зондовых методик отбора пробы возникают проблемы, связанные с возмущениями, вносимыми пробоотборниками. Зонд вносит гидродинамические и тепловые возмущения, искажая поле скоростей потока и поле температуры. Как было показано ра-

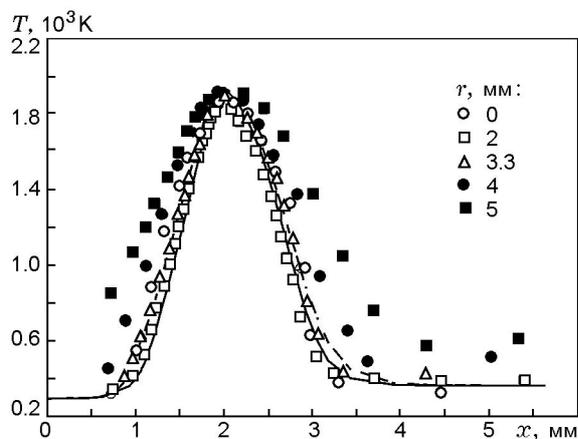


Рис. 3. Распределение температуры в пламени по оси горелки и на различных расстояниях r от нее:

x — расстояние от сопла с горючим, значки — эксперимент, линии — моделирование: сплошная — граничные условия потенциального потока, штриховая — граничные условия «поршневого» потока

нее, возмущения, вносимые микрозондом в пламя, менее существенны, чем вносимые «звуковым» зондом. Очевидно, что вопрос о возмущениях пламени «звуковыми» пробоотборниками имеет особое значение при исследовании структуры пламени на встречных потоках из-за их сложной структуры и невозможности расположить ось «звукового» зонда вдоль потока, не создавая больших возмущений, как в случае зондирования плоских пламен.

Визуальные наблюдения показали, что введение «звукового» зонда перпендикулярно оси горелки, так, что кончик зонда находится на ее оси, существенно искажает пламя, в то время как аналогичное введение микрозонда не приводит к его искажениям. Однако если кончик «звукового» зонда находится на периферии пламени на расстоянии от оси горелки $r = 3.3$ мм, то визуально искажения пламени не наблюдаются. Расстояние $r = 3.3$ мм соответствует внутреннему радиусу трубок горелки. В модели пламени, принятой в программе OPDIF, предполагается, что все зависимые переменные — функции только аксиальной координаты, а значит, распределение концентраций веществ в пламени не зависит от радиальной координаты. Мы поставили задачу проверить это предположение. Если оно верно, то экспериментальные результаты при отборе пробы «звуковым» зондом, размещенным перпендикулярно потоку на расстоянии 3.3 мм от

оси горелки, будут соответствовать результатам, полученным при отборе пробы по оси горелки.

Для этого была исследована тепловая и химическая структура пламени на встречных потоках по оси горелки и на различных расстояниях от нее с помощью микрозонда и микротермопары. Кроме того, выполнено моделирование структуры пламени вдоль оси горелки и полученные экспериментальные результаты сопоставлены с данными моделирования.

Тепловая структура пламени

Распределение температуры в пламени по оси горелки и на различных расстояниях от нее в интервале $r = 0 \div 5$ мм представлено на рис. 3. На рисунке также показаны профили температуры (вдоль оси горелки), полученные моделированием при двух способах задания граничных условий для распределения скоростей. Видно, что изменение граничных условий не приводит к существенным различиям рассчитанных профилей температуры. На всех экспериментальных и рассчитанных профилях максимальная температура одна и та же. Ширина экспериментальных профилей (на половине максимума) на расстояниях $r = 0 \div 3.3$ мм одинакова, и в пределах погрешности измерений она совпадает с шириной рассчитанных профилей температуры по оси горелки. Этот факт позволяет сделать вывод, что распределение температуры вдоль оси горелки на расстояниях $r < d/2$ (d — внутренний диаметр трубок горелки) совпадает с распределением температуры по оси горелки. Однако экспериментальные профили при $r > d/2$ оказались более широкими по сравнению с профилями при $r < d/2$. Таким образом, результаты, приведенные на рис. 3, демонстрируют одномерность тепловой структуры пламени на расстояниях от оси горелки, не превышающих внутреннего радиуса трубок горелки. Согласие результатов расчета и эксперимента свидетельствует о том, что выбранные при моделировании граничные условия определены правильно.

Чтобы достичь согласия с экспериментальными профилями (как показано на рис. 3), расчетные профили температуры необходимо было сдвинуть на расстояние 1.07 см вдоль оси горелки в направлении к соплу с потоком топлива. Это говорит о том, что модель плохо предсказывает действительное положение профиля температуры, а значит, положение пла-

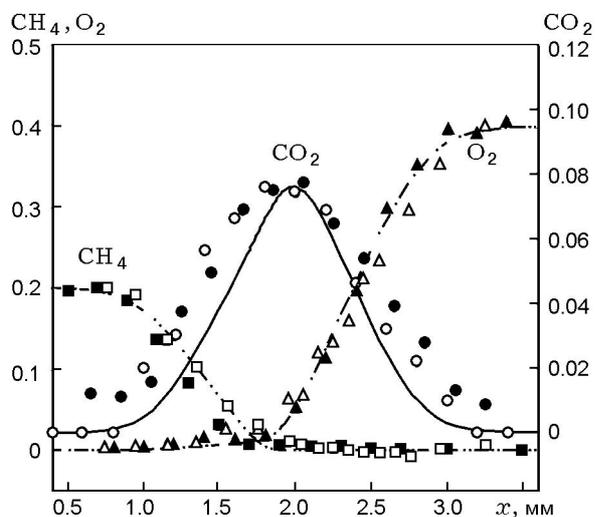


Рис. 4. Профили молярных концентраций CH_4 , O_2 и CO_2 в пламени:

значки — эксперимент: темные — отбор пробы на периферии пламени ($r = 3.3$ мм) с использованием метода МПМС, светлые — отбор пробы микрозондом по оси горелки; линии — моделирование с граничными условиями «поршневого» потока

мени. Этот факт отмечали и другие исследователи [5, 15, 16]. Кроме того, авторы работы [5] обнаружили, что расчетный профиль концентрации гидроксила также неверно (по положению максимума концентрации) описывает экспериментальные данные, полученные спектроскопическим методом. Поэтому они сдвигали рассчитанный профиль так, чтобы достичь согласия с экспериментом. По-видимому, это связано с тем, что в модели пламени не учитываются потери тепла, в частности потери тепла в горелку. В настоящей работе этот сдвиг учитывался как для профиля температуры, так и для профилей концентраций веществ. Для наших условий он оказался равным 1.07 мм.

Распределение концентраций стабильных веществ в пламени

Микрозондовая система отбора пробы была применена для измерения профилей концентраций стабильных веществ (CH_4 , O_2 , CO_2) в пламени параллельно оси горелки на расстояниях $r = 0, 1, 2$ и 3.3 мм от ее оси. На рис. 4 представлены профили концентраций стабильных веществ вдоль оси горелки, полученные с помощью микрозондовой системы. Для остальных положений зонда ($0 < r < 3.3$ мм) экспериментальные данные на этом рисунке не приве-

дены, так как они в пределах погрешности совпадают с данными по оси горелки ($r = 0$). Этот экспериментальный факт указывает на то, что химическая структура пламени на встречных потоках (по стабильным компонентам) также одномерна при $0 < r < d/2$. Это согласуется с приведенными выше данными по тепловой структуре пламени. Таким образом, экспериментально подтверждено предположение об «одномерности» пламени на встречных потоках, положенное в основу программы OPPDIF. Установленный факт позволяет располагать «звуковой» зонд перпендикулярно оси горелки на расстоянии от оси $d/2$ при измерении профилей концентраций веществ вдоль оси горелки. Это, в свою очередь, дает возможность минимизировать возмущения, вносимые в пламя «звуковым» зондом.

Очевидно, что для доказательства того, что «звуковой» зонд не вносит искажений в пламя при пробоотборе с периферии пламени, одних визуальных наблюдений недостаточно. Для дальнейшего обоснования использования «звукового» зонда для пламени на встречных потоках и определения вносимых в пламя возмущений были измерены с его помощью профили концентраций стабильных веществ (CH_4 , O_2 , CO_2) и результаты сопоставлены с данными, полученными с помощью микрозондовой системы. На рис. 4 приведены данные этих измерений, а также результаты моделирования при помощи OPPDIF с граничными условиями «поршневого» потока. Видно, что экспериментальные результаты, полученные при отборе пробы микрозондом и «звуковым» зондом, достаточно хорошо согласуются. Такое согласие свидетельствует о том, что возмущения, вносимые «звуковым» зондом в пламя при отборе пробы по его периферии, не значительно возмущений, вносимых в пламя микрозондом. Это подтверждает целесообразность использования МПМС для получения экспериментальных данных по структуре пламени на встречных потоках.

Представленные на рис. 4 рассчитанные профили концентраций CH_4 и O_2 удовлетворительно согласуются с экспериментальными. Однако ширина профилей концентрации CO_2 , измеренных с использованием как микрозонда, так и «звукового» зонда, несколько превышает ширину (на половине от максимальной концентрации) рассчитанного профиля концентрации CO_2 . Вероятно, это результат возмуще-

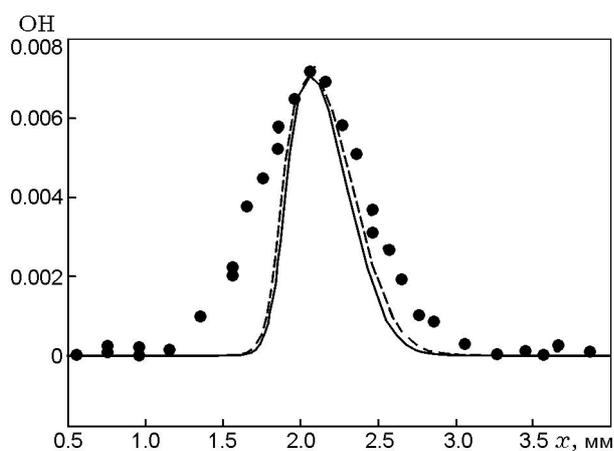


Рис. 5. Распределение мольной концентрации гидроксидов в пламени:

значки — эксперимент, отбор проб на периферии пламени ($r = 3.3$ мм) с использованием метода МПМС; линии — моделирование: сплошная — граничные условия потенциального потока, штриховая — граничные условия «поршневого» потока

ний, вносимых пробоотборниками в пламя, и уширение, по всей видимости, обусловлено искажением линий тока за счет стока вещества в зонд.

Профили концентрации ОН

На рис. 5 представлены профили концентраций радикала ОН в пламени. Экспериментальные данные получены методом МПМС. Ширина экспериментального профиля концентрации ОН на половине максимума приблизительно в 1.9 раза превосходит ширину рассчитанного с граничными условиями потенциального потока. Причины такого расхождения вряд ли связаны с результатами моделирования. Так, например, в работах [5, 6], где профили концентрации ОН получены методом ЛИФ, наблюдается хорошее согласие экспериментальных и рассчитанных профилей по ширине. Это означает, что результаты моделирования (с использованием механизма GRI 3.0) корректно описывают распределение концентрации ОН в метановых пламенах. В работе [5] проведен анализ зависимости ширины профиля концентрации ОН (на полувысоте) от задаваемых граничных условий при моделировании метанового пламени на встречных потоках. Установлено, что изменение ширины этого профиля при переходе от граничных условий потенциального потока к граничным условиям

«поршневого» потока незначительно и составляет $10 \div 15$ %. Однако состав пламени, исследуемых в [5], отличается от состава в нашем случае. Поэтому мы провели также моделирование с граничными условиями, соответствующими «поршневому» течению. Как видно из рис. 5, ширина рассчитанного нами профиля концентрации ОН увеличилась незначительно, всего на 16 %. Таким образом, изменение граничных условий также не привело к согласию по ширине рассчитанного и экспериментального профилей концентрации ОН. Ширина измеренного профиля концентрации ОН превосходит ширину рассчитанного (с граничными условиями «поршневого» течения) в 1.6 раза. По-видимому, так же как и для CO_2 , причиной такого расхождения следует считать возмущения, вносимые зондом в пламя. Отметим, что уширения экспериментальных профилей концентраций CO_2 и ОН, по сравнению с рассчитанными, несколько отличаются (в 1.4 раза для CO_2 и в 1.6 раза для ОН), следовательно, возмущающее влияние пробоотборника на профили концентраций различных веществ в пламени различно. Вероятно, что величина уширения зависит от транспортных свойств вещества.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное исследование структуры диффузионного пламени на встречных потоках CH_4/N_2 — O_2/N_2 методом микрозондовой масс-спектрометрии и микротермопарным методом показало, что тепловая и химическая структура пламени одномерна на расстояниях от оси горелки, не превышающих внутреннего радиуса трубок горелки. Это позволило провести отбор и анализ пробы с периферии пламени методом молекулярно-пучковой масс-спектрометрии. Измерено распределение концентрации гидроксидов в пламени на встречных потоках с использованием этого метода. Полное согласие между собой экспериментальных результатов, полученных с помощью микрозонда и «звукового» зонда, свидетельствует о том, что возмущения, вносимые «звуковым» зондом в пламя при отборе пробы по его периферии, не превышают возмущений, вносимых в пламя микрозондом. Таким образом, показана возможность использования молекулярно-пучковой масс-спектрометрии для получения экспериментальных

данных по структуре пламени на встречных потоках.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Li S. C., Williams F. A.** Counterflow heptane flame structure // *Proc. Combust. Inst.* 2000. V. 28. P. 1031–1038.
2. **Waly M. M. Y., Williams F. A.** Structures of non-sooting counterflow diluted acetylene-air flames // *Ibid.* P. 2005–2012.
3. **Skaggs R. R., Daniel R. G., Miziolek A. W., McNesby K. L.** Spectroscopic studies of inhibited opposed flow propane/air flames // *Proc. First Joint Meeting of the U.S. Sections of the Combustion Institute.* Washington, DC, 1999. P. 575–578.
4. **Thomsen D. D., Laurendeau N. M.** LIF measurements and modeling of nitric oxide concentration in atmospheric counterflow premixed flames // *Combust. Flame.* 2001. V. 124. P. 350–369.
5. **MacDonald M. A., Gouldin F. C., Fisher E. M.** Temperature dependence of phosphorus-based flame inhibition // *Combust. Flame.* 2001. V. 125. P. 668–683.
6. **Siow J. E., Laurendeau N. M.** Flame inhibition activity of phosphorus-containing compounds using laser-induced fluorescence measurements of hydroxyl // *Combust. Flame.* 2004. V. 136. P. 16–24.
7. **Fisher E. M., Williams B. A., Fleming J. W.** Determination of the strain in counterflow diffusion flames from flow conditions // *Proc. Eastern States Sect. Combust. Inst.* 1997. P. 191–194.
8. **Chelliah H. K., Law C. K., Ueda T., et al.** An experimental and theoretical investigation of the dilution pressure and flow field effects on the extinction condition of methane-air-nitrogen diffusion flames // *Proc. Combust. Inst.* 1990. V. 23. P. 503–510.
9. **Seshadri K., Williams F. A.** Laminar flow between parallel plates with injection of a reactant at high Reynolds number // *Intern. J. Heat Mass Transfer.* 1978. V. 21. P. 251–253.
10. **Korobeinichev O. P., Il'in S. B., Mokrushin V. M., Shmakov A. G.** Destruction chemistry of dimethyl methylphosphonate in $H_2/O_2/Ar$ flames studied by molecular beam mass spectrometry // *Combust. Sci. Technol.* 1996. V. 116–117. P. 51–67.
11. **Lutz A. E., Kee R. J., Grcar J. F., Rupley F. M.** Chemkin collection, unlimited release // Sandia National Laboratories. Livermore, CA, 1997.
12. **Kee R. J., Rupley F. M., Miller J. A.** Chemkin-II: A Fortran chemical Kinetics package for the analysis of gas-phase chemical kinetics // Sandia National Laboratories. 1989. SAND 89-8009B.
13. **Химия горения** / Под ред. У. Гардинера-мл. М.: Мир, 1988.
14. **Smith G. P., Golden D. M., Frenklach M., et al.** GRI Mech 3.0 // http://www.me.berkeley.edu/gri_mech/.
15. **Ravikrishna R. V., Cooper C. S., Laurendeau N. M.** Comparison of saturated and linear laser-induced fluorescence measurements of nitric oxide in counterflow diffusion flames // *Combust. Flame.* 1999. V. 117. P. 810–820.
16. **Chelliah H. K., Bui-Pham M., Seshadri K., Law C. K.** Numerical descriptions of the structure of counterflow heptane-air flames using detailed and reduced chemistry with comparison to experiments // *Proc. Combust. Inst.* 1992. V. 24. P. 851–857.

Поступила в редакцию 1/VI 2005 г.