

УДК 536.46

## ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ ЗОНДА МОЛЕКУЛЯРНО-ПУЧКОВОЙ УСТАНОВКИ ВО ФРОНТЕ ПЛАМЕНИ ПРИ ДАВЛЕНИЯХ $1 \div 5$ АТМ

А. М. Дмитриев<sup>1,2</sup>, М. В. Агафонцев<sup>3</sup>, Е. Л. Лобода<sup>3</sup>, Д. А. Князьков<sup>1,2</sup>,  
О. П. Коробейничев<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт химической кинетики и горения им. В. В. Воеводского СО РАН, 630090 Новосибирск  
artem\_dmitriev@inbox.ru

<sup>2</sup>Новосибирский государственный университет, 630090 Новосибирск

<sup>3</sup>Томский государственный университет, 634050 Томск

Метод зондового отбора газовых проб активно используется для исследования процессов высокотемпературного окисления. Такая методика позволяет напрямую получать информацию о химическом составе реакционного объема, однако зонд неизбежно вносит тепловые и газодинамические возмущения в систему. В работе были измерены профили температуры поверхности кварцевого зонда в пламени смеси  $\text{CH}_4/\text{O}_2/\text{Ar}$  в диапазоне давления  $1 \div 5$  атм. Измерения проводились бесконтактным методом при помощи тепловизора, который калибровался по результатам термомпарных измерений с учетом экранирования пламенем. Полученные данные могут быть использованы в качестве граничных условий при численном моделировании процесса пробоотбора, что позволит значительно повысить точность оценки погрешностей при использовании зондовых методов.

Ключевые слова: зондовые возмущения, термография, микротермопары, ламинарное пламя, повышенное давление.

DOI 10.15372/FGV20190505

### ВВЕДЕНИЕ

Отбор газовых проб из разных зон пламени с их дальнейшим анализом является информативным и широко применяемым методом исследования химии горения различных топлив [1]. Для отбора газа из пламени используются различные пробоотборники (зонды). Как правило, пробоотборный зонд представляет собой кварцевый или металлический конус высотой несколько сантиметров с отверстием в вершине. Диаметр отверстия изменяется от 20 до 500 мкм в зависимости от рабочего давления и производительности системы откачки. Угол раствора конуса обычно варьируется в диапазоне  $10 \div 90^\circ$  и определяет режим отбора пробы — натекание ( $<40^\circ$  условно) или режим молекулярного пучка ( $\geq 40^\circ$ ). Наибольшее распространение получил второй режим. С одной стороны, молекулярно-пучковые исследова-

ния представляют больший интерес, так как позволяют измерять концентрации радикалов, но с другой стороны, зонды с большим углом раствора вносят значительные возмущения в тепловую, химическую и гидродинамическую структуру пламени в виде нарушения теплового баланса и стока тепла, а также физического барьера для газового потока. Помимо того, на поверхности зонда могут протекать химические реакции, в частности рекомбинация радикалов [1–3]. Эти возмущения приводят к искажению профилей температуры и концентраций соединений во фронте пламени и, таким образом, становятся причиной систематической ошибки измерений, исключить которую невозможно.

Одной из основных целей современной науки о горении является построение точных химико-кинетических механизмов окисления топлив в широком диапазоне условий. Повышение предсказательной точности расчетов невозможно без повышения точности экспериментальных данных, на которых верифицируются механизмы горения. Удобной систе-

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 17-38-50009\_мол-нр).

© Дмитриев А. М., Агафонцев М. В., Лобода Е. Л., Князьков Д. А., Коробейничев О. П., 2019.

мой для исследования кинетики горения топлив является квазиодномерное ламинарное пламя. Однако на данный момент самая используемая модель одномерного ламинарного пламени, описанная кодом PREMIX [4] из пакета CHEMKIN [5], никак не учитывает взаимодействия пламени с зондом. В связи с этим сопоставление экспериментальных данных с расчетными всегда требует «ручной» корректировки положения профилей температуры и молярной доли основных веществ. Для точного и однозначного сопоставления данных эксперимента с расчетами в CHEMKIN (или аналогичной программе) требуется моделирование поведения газа на входе в зонд с учетом химико-кинетических процессов.

Благодаря развитию экспериментальных методов и компьютерных технологий, исследование зондовых возмущений перешло от качественного рассмотрения к количественному. В работе [6] методом лазерной индуцированной флуоресценции было определено искажение температурного поля вокруг зонда, показано влияние присутствия зонда на пиковые молярные доли характерных промежуточных веществ в богатом пламени пропана. Авторы [6] подчеркивают необходимость учета возмущений при сравнении расчетов моделей с экспериментальными данными, полученными зондовым методом. Более подробное исследование проведено в работе [7], где исследовались зондовые возмущения на двух установках с применением зондов разной геометрии. Проводилось комплексное измерение профилей температуры и молярной доли компонентов. В работе [8] исследовалось температурное поле вокруг зонда в богатом пламени  $\text{CH}_4/\text{O}_2/\text{Ar}/\text{Kr}$ . При помощи рентгенофлуоресцентного анализа с высокой точностью удалось показать масштабы искажения зондом температуры пламени на оси и в радиальном направлении. Во всех упомянутых работах пламена стабилизировались при низком ( $\approx 100$  Торр) давлении. Компьютерное моделирование зондовых возмущений при атмосферном давлении проведено в работе [9]. Рассматривалась задача о натекании идеального газа с распределенными источниками тепла на зонд. Решая полную систему уравнений Навье — Стокса и используя экспериментальные значения температуры поверхности зонда в качестве граничных условий, авторы [9] рассчитали температурное поле и характерное поведение газа в окрестности отверстия зонда.

Такой же подход использован в работе [10], но с применением другого способа моделирования. Включение кинетического механизма в процесс моделирования системы позволило более точно показать влияние зонда на профили концентрации соединений в пламени. Предложенный авторами [10] подход является эффективным методом учета зондовых возмущений, однако требует доработки и развития. Для корректного расчета необходимы большие вычислительные мощности, которые можно сократить, добавив в модель экспериментально измеренные параметры. Таким параметром является температура поверхности зонда, определяемая тепловыми потоками из пламени в зонд и из зонда в охлаждаемый фланец. Цель настоящей работы — экспериментальное измерение температуры поверхности зонда во фронте метанового пламени.

## ЭКСПЕРИМЕНТ

В работе измерялась температура поверхности пробоотборника молекулярно-пучковой масс-спектрометрической (МПС) установки, находящейся в ИХКГ СО РАН, которая используется для исследования химической структуры пламен при атмосферном и повышенном давлении [11, 12]. Пробоотборник представлял собой кварцевый конус высотой 15.2 мм с отверстием диаметром 120 мкм в вершине. Толщина стенки, составлявшая 140 мкм у кончика, увеличивалась до 270 мкм у основания. Внутренний угол раствора конуса  $40^\circ$ . Зонд крепился к термостатированному фланцу, температура охлаждающей воды составляла  $18 \div 20$  °С.

Температура поверхности зонда измерялась в предварительно перемешанных пламенах, стабилизированных на плоской горелке. Измерения проводились в бедном метановом пламени при атмосферном давлении и в стехиометрическом метановом пламени при давлениях  $p = 1, 3$  и  $5$  атм. Для стабилизации пламен при атмосферном давлении использовалась плоская горелка Бота — Сполдинга диаметром 16 мм [11]. Для работы при повышенном давлении применялась плоская горелка диаметром 6 мм [12]. Характеристики бедного пламени  $\text{CH}_4/\text{O}_2/\text{Ar}$  (0.06/0.15/0.79 (в молярных долях), расход  $25 \text{ см}^3/\text{с}$ , коэффициент избытка горючего  $\phi = 0.8$ , линейная скорость газа на выходе из горелки  $v = 15.4 \text{ см}/\text{с}$ ) взяты анало-

гичными работе [9]. Составы стехиометрических пламен при атмосферном и повышенных давлениях, а также условия стабилизации соответствуют работе [12]: смесь  $\text{CH}_4/\text{O}_2/\text{Ar}$  состава 0.0833/0.1667/0.75, полный расход  $50 \text{ см}^3/\text{с}$  ( $v = 27.9 \text{ см}/\text{с}$ ) при атмосферном давлении и  $22 \text{ см}^3/\text{с}$  при давлениях 3 атм ( $v = 29 \text{ см}/\text{с}$ ) и 5 атм ( $v = 17.4 \text{ см}/\text{с}$ ). Измерения при повышенном давлении проводились в камере высокого давления, также описанной в [12].

Так как микротермопарные измерения температуры поверхности в каждой точке довольно трудоемкие (особенно в камере высокого давления), было решено использовать оптический метод, позволяющий получить мгновенную картину температурного распределения на половине поверхности зонда. Использовался тепловизор JADE J530SB с разрешением матрицы  $320 \times 240$  пикселей с набором узкополосных оптических фильтров с полосами пропускания  $2.5 \div 2.7$ ,  $2.64 \div 3.25$ ,  $3.1 \div 3.3$ ,  $3.7 \div 3.9$ ,  $4.0 \div 5.0$  мкм. Спектральный интервал выбирали исходя из принципов, изложенных в [13]. При  $p = 1$  атм измерения проводились в спектральном интервале  $3.7 \div 3.9$  мкм, где отсутствовало излучение пламени горелки, а при повышенных давлениях  $p = 3$  и 5 атм выбор фильтра со спектральным интервалом  $2.5 \div 2.7$  мкм обусловлен оптическими свойствами смотрового окна камеры повышенного давления. При работе с высокими давлениями выбран спектральный интервал измерений, в котором присутствует излучение пламени, экранирующего зонд, а оптические свойства стекла смотрового окна камеры повышенного давления отличны от идеальных и ослабляют регистрируемое излучение. Поэтому дополнительно были проведены измерения коэффициента пропускания стекла в исследуемом спектральном интервале на модели абсолютно черного тела АЧТ-45/100/1100. Кроме того, учет ослабления излучения зонда пламенем и его собственное излучение в спектральном интервале исследований корректировались с помощью подбора эффективного коэффициента излучения по данным реперной термопары и методики [14].

Для реперных термопарных измерений использовались тонкие Pt/Pt-Rh(10%) термопары, покрытые слоем  $\text{SiO}_2$  для предотвращения каталитических реакций на поверхности. Конфигурация термопары представлена на рис. 1. Толщина проволоки составляла  $30 \text{ мкм}$ , общая

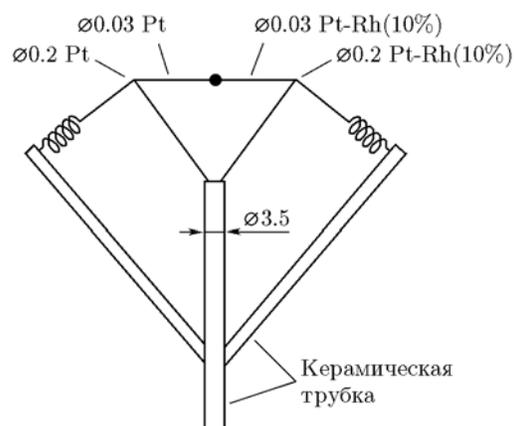


Рис. 1. Конфигурация термопары

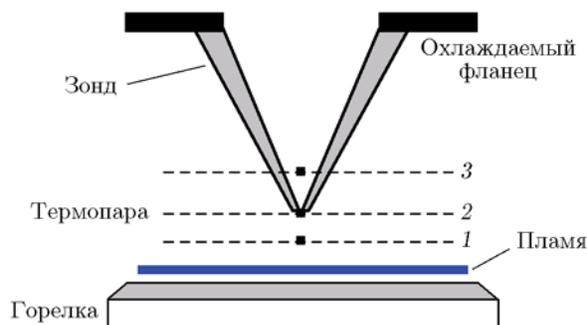


Рис. 2. Положения термопары (1–3) относительно горелки и зонда при измерениях в пламени

толщина термопар с покрытием  $60 \pm 15 \text{ мкм}$ . Термопара помещалась под зондом параллельно плоскости горелки, на оси пламени (рис. 2, положение 1), а также на некотором расстоянии от плоскости горелки — на вершине возле отверстия зонда (положение 2) и на стенке (положение 3) выше отверстия. В пламенах при  $p = 3$  и 5 атм измерялась только температура стенки (положение 3). Для измерения температуры стенки пробоотборника термопары натягивались на зонд, обхватывая его по внешней поверхности конуса. Таким образом достигался хороший тепловой контакт между поверхностью и термопарой по всей длине плеча термопары. Положение термопары и горелки относительно зонда контролировалось при помощи катетометра с точностью  $\pm 20 \text{ мкм}$ . В каждой точке проводилось не менее двух измерений.

Для учета потерь на излучение в отсутствие контакта с зондом вычислялась темпе-

ратурная поправка по формуле, предложенной в работе [15]:

$$\Delta T = T_g - T_c = \frac{1}{\lambda} \left[ 1.25 \varepsilon \sigma d^{0.75} (T_c^4 - T_w^4) \left( \frac{\eta}{\rho v} \right)^{0.25} \right],$$

где  $T_g$  — температура газа,  $T_c$  — температура спая термопары,  $T_w$  — температура окружающей среды,  $\varepsilon$  — степень черноты термопары,  $\sigma$  — постоянная Стефана — Больцмана,  $d$  — диаметр термопары,  $\lambda$  — коэффициент теплопроводности газа,  $\eta$  — коэффициент вязкости газа,  $\rho$ ,  $v$  — плотность и скорость газа. Так как аргон составлял основную часть газовой смеси (его молярная доля в горючих смесях  $75 \div 80 \%$ ), коэффициенты вязкости и теплопроводности взяты для него с учетом их зависимости от температуры [16]. Зависимость коэффициента излучения  $\varepsilon$  от температуры исследовалась в работе [17] и также была учтена при расчете поправки. Абсолютная погрешность измерений температуры пламени без контакта с зондом составляла  $\pm 20$  К.

Точная оценка погрешности термопарных измерений при контакте с зондом требует полного численного расчета, учитывающего излучение зонда и термопары, теплообмен термопары с зондом и гидродинамические возмущения. Такой расчет представляет собой сложную задачу и является целью наших будущих исследований. Однако в условиях хорошего теплового контакта зонд — термопара можно не учитывать поправку на излучение, так как она по порядку величины совпадает с дополнительным разогревом за счет торможения потока [17]. Статистическая погрешность измерений также не превышала  $\pm 20$  К.

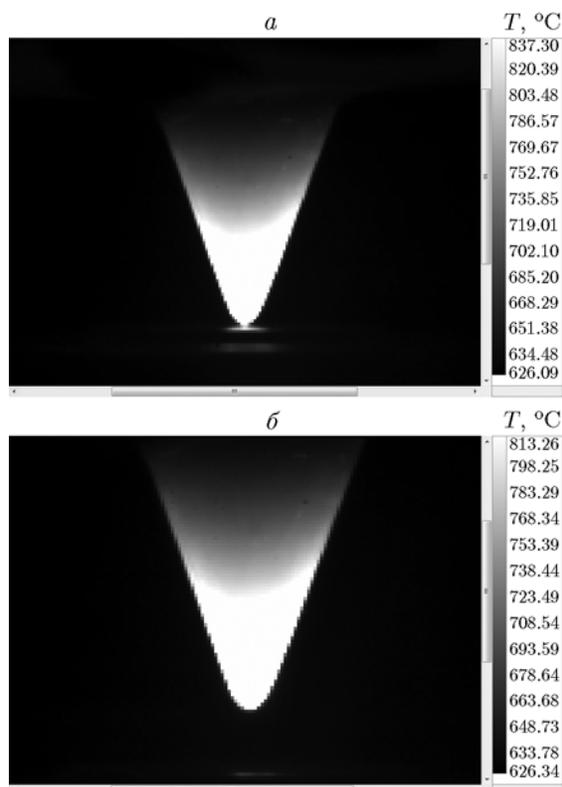


Рис. 3. Пример термограммы поверхности зонда в бедном метановом пламени:

$p = 1$  атм;  $a$  —  $h = 0.1$  мм,  $b$  —  $h = 3$  мм

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В работе измерялась температура поверхности зонда в метановых пламенах бедной и стехиометрической смеси. В таблице приведены составы пламен, рабочие давления и скорости потоков, использованные в экспериментах.

На рис. 3 представлены температурные поля на поверхности зонда в бедном метановом пламени при атмосферном давлении. Расстояния от вершины зонда до горелки  $h = 0.1$  и 3 мм. Термограммы сняты в спектральном

Параметры пламен в экспериментах

Пламя	$\phi$	$p$ , атм	Состав, молярная доля			$v$ , см/с
			CH <sub>4</sub>	O <sub>2</sub>	Ar	
Бедное	0.8	1	0.06	0.15	0.79	17.8
Стехиометрическое	1	1	0.0833	0.166	0.75	27.9
	1	3	0.0833	0.166	0.75	29.9
	1	5	0.0833	0.166	0.75	29.9

интервале  $3.7 \div 3.9$  мкм. Так как излучательная способность зонда (коэффициент излучения) относительно мала (0.35), соответственно достаточно велика отражательная способность. Поэтому на малых расстояниях от поверхности горелки, вследствие кривизны кончика зонда, на крайних пикселях присутствует отражение излучения поверхности горелки. Это хорошо заметно на рис. 3 ( $h = 0.1$  мм). При обработке термографических измерений данные с этих пикселей не учитывались. Тем не менее отраженное от горелки излучение давало заметный вклад в полное излучение от поверхности зонда, что увеличивало погрешность при малых значениях  $h$  (до 1 мм).

Наиболее сложной областью измерений была вершина зонда в окрестности отверстия. На рис. 4 представлены профили температуры на вершине зонда, измеренные микротермопарой и тепловизором в бедном и стехиометрическом пламенах при атмосферном давлении. Положение термопар соответствовало положению 2 на рис. 2. Профили в основной зоне пламени ( $h < 1$  мм) существенно расходятся, причем наибольшее расхождение соответствует наименьшим значениям  $h$ . Это расхождение непосредственно связано с большим потоком излучения, отраженного от поверхности горелки, что приводит к завышению видимой температуры зонда. В зоне конечных продуктов ( $h > 1$  мм) температура достигает максимального значения и уже слабо меняется с расстоянием, что приводит к удовле-

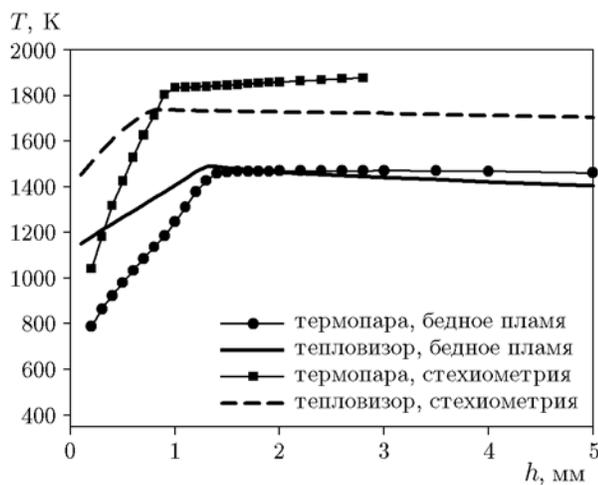


Рис. 4. Профили температуры кончика зонда, измеренные термопарой и тепловизором в бедном и стехиометрическом пламенах

творительному согласию между тепловизионными и термопарными измерениями. Наблюдаемые расхождения при больших значениях  $h$ , по-видимому, связаны с изменением химического состава пламени. В целом максимальное расхождение профилей в зоне конечных продуктов не превысило 10 %. Стоит отметить, что, согласно результатам измерений [9, 12], при атмосферном давлении основная реакционная зона (зона наибольшего градиента температуры) в бедном пламени составляла  $\approx 1.0$  мм, а в стехиометрическом пламени — около 0.7 мм. При  $p = 3$  и 5 атм основная зона имела ширину  $\approx 0.3$  мм.

Особый интерес представляет распределение температуры вдоль поверхности зонда. На рис. 5 представлены профили температуры на поверхности зонда по направлению от его вершины к основанию, измеренные тепловизором. В качестве начала координат взята поверхность горелки. Каждая кривая соответствует отдельному измерению на заданном расстоянии зонд — горелка. Хорошо видно, как при изменении расстояния от кончика зонда до горелки меняется характер распределения температуры на поверхности при удалении от горелки. Находясь близко к горелке, наиболее горячая зона пламени оказывается чуть выше кончика зонда, что соответствует изгибам на кривых  $0.1 \div 0.7$  мм. На расстоянии от 1 мм, соответствующем ширине основной зоны тепловы-

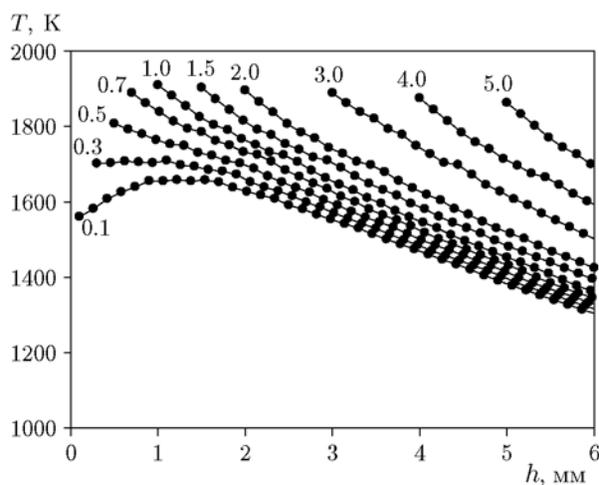


Рис. 5. Профили температуры вдоль поверхности зонда в стехиометрическом пламени при  $p = 1$  атм:

цифры указывают положение вершины относительно горелки, мм

деления, и далее профиль распределения характеризует спад температуры от горячей вершины до холодного основания. В работе [6] сделан вывод, что при атмосферном давлении зондовые возмущения менее значительны, так как зонд всё время находится при температуре, соответствующей зоне конечных продуктов. Однако наши измерения в атмосферном метановом пламени указывают на то, что градиент температуры поверхности зонда меняет свой знак в зависимости от положения в пламени, а значит, возможен подвод тепла по зонду из горячей зоны в более холодную.

Можно предположить, что при повышении давления картина изменится. На рис. 6 представлены профили распределения температуры вдоль поверхности зонда в метановом пла-

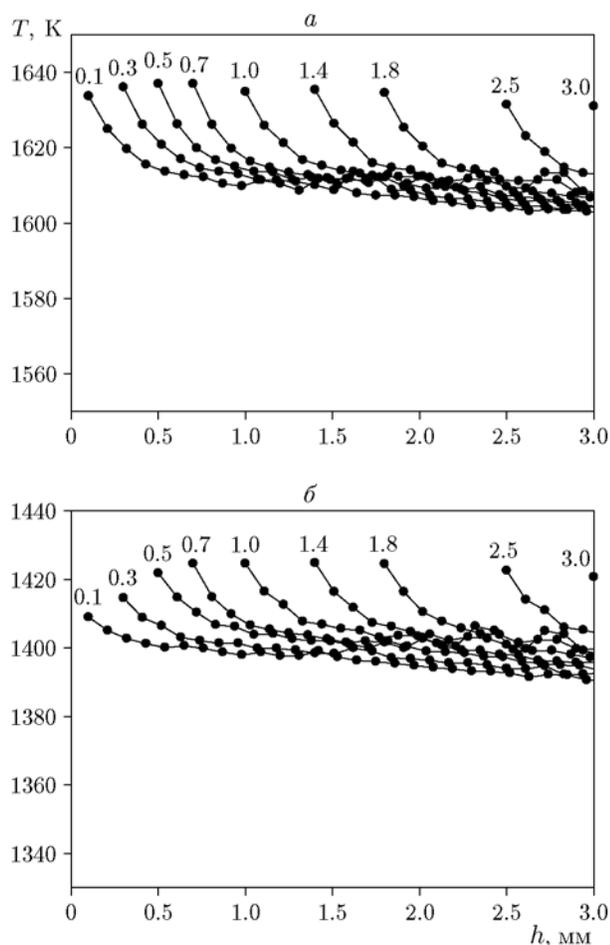


Рис. 6. Профили температуры вдоль поверхности зонда в стехиометрическом пламени при  $p = 3$  (а) и 5 атм (б):

цифры указывают положение вершины относительно горелки, мм

мени при  $p = 3$  и 5 атм. Видно, что характерная форма профилей отличается от профилей при атмосферном давлении: температура кончика зонда слабо меняется при изменении  $h$  и быстро спадает при удалении от вершины. Это соответствует тому, что зонд все время находится при температуре, соответствующей конечной зоне пламени. Очень узкой зоне горения при  $p = 3$  атм соответствует очень узкая зона градиента температуры, который почти полностью нивелируется на поверхности зонда. Стоит отметить малую мощность пламени при данных условиях, в связи с чем зонд прогрелся только у самого отверстия и температура поверхности резко падала по направлению к основанию. Так как на профилях температуры поверхности отсутствуют выпуклости (более высокая температура на большем расстоянии от вершины), можно утверждать, что зонд не подводит тепло из горячих зон пламени в зону предварительного подогрева, т. е. не перераспределяет тепло в зоне горения.

Аналогичная картина получена в пламени при  $p = 5$  атм: форма профилей температуры поверхности зонда совпадает с формой профилей при  $p = 3$  атм. Можно выделить только два отличия. Во-первых, температура поверхности зонда при  $p = 5$  атм меньше, чем в пламени при  $p = 3$  атм. Это связано с тем, что при большем давлении пламя сильнее прижимается к поверхности горелки, тем самым увеличивая теплоотвод в горелку. Во-вторых, при  $p = 5$  атм температура поверхности быстрее достигает температуры конечной зоны пламени, что также связано с более узкой зоной пламени при повышенном давлении.

Полученные результаты наглядно характеризуют тепловое возмущение метанового пламени в стандартных экспериментах на МПМС-установке при различных давлениях. Для пламен, стабилизированных при высоком давлении, зонд выступает лишь в роли стока тепла и его тепловое влияние отражается только в снижении температуры пламени под зондом. Для пламен, стабилизированных при атмосферном давлении, зонд является не только стоком тепла, но и перераспределяет тепло в основной зоне горения. Находясь близко к горелке, зонд дополнительно подогревает свежую горючую смесь, выходящую из горелки. Для точной оценки влияния подвода тепла на химическую структуру пламени необходимо развитие численной модели зондовых возмущений.

Данные экспериментальных измерений, несомненно, помогут в усовершенствовании такой модели.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Используя термографические измерения в комбинации с микротермопарными измерениями, удалось измерить распределение температуры на поверхности кварцевого зонда МПМС-установки в предварительно перемешанных метановых пламенах, стабилизированных на плоской горелке при давлениях 1, 3 и 5 атм. Температурные поля регистрировались тепловизором, а для подбора эффективного коэффициента излучения проводились реперные измерения тонкими термопарами в пламени и на поверхности зонда. При обработке тепловизионных данных учитывалось экранирование поверхности зонда пламенем и смотровым окном при работе с высокими давлениями. Проанализированы данные по распределению температуры на поверхности зонда в зависимости от расстояния между горелкой и зондом для разных пламен и давлений. Установлено, что в каждой точке поверхности по оси зонда при атмосферном давлении профиль температуры на поверхности подобен растянутому профилю температуры в пламени. Это соответствует подводу тепла по зонду в зону предварительного подогрева пламени. При давлениях же 3 и 5 атм профиль температуры на поверхности соответствует таковому в зоне продуктов горения и температура каждой точки поверхности незначительно меняется в зависимости от расстояния до горелки. Это указывает на то, что зона пламени в данных условиях очень узкая, и на любом расстоянии до горелки зонд находится в конечной зоне пламени. Такое влияние зонда минимально искажает градиент температуры реакционной зоны пламени, что в конечном счете упрощает сравнение экспериментальных данных по структуре пламени с кинетическими расчетами. Полученные результаты полезны для развития и проверки моделей зондовых возмущений.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Hansen N., Cool T. A., Westmoreland P. R., Kohse-Höinghaus K. Recent contributions of flame-sampling molecular-beam mass spectrometry to a fundamental understanding of combustion chemistry // *Prog. Energy Combust. Sci.* — 2009. — V. 35, N 2. — P. 168–191.
2. Biordi J. C. Molecular beam mass spectrometry for studying the fundamental chemistry of flames // *Prog. Energy Combust. Sci.* — 1977. — V. 3, N 3. — P. 151–173.
3. Biordi J. C., Lazzara C. P., Papp J. F. Molecular beam mass spectrometry applied to determining the kinetics of reactions in flames. I. Empirical characterization of flame perturbation by molecular beam sampling probes // *Combust. Flame.* — 1974. — V. 23, N 1. — P. 73–82.
4. Kee R. J., Grcar J. F., Smooke M. D., Miller J. A., Meeks E. PREMIX: a Fortran program for modeling steady laminar one-dimensional premixed flames // SAND85-8240. — Sandia National Labs, Livermore, CA, USA, 1985.
5. Kee R. J., Rupley F. M., Miller J. A. Chemkin-II: A Fortran Chemical Kinetics Package for the Analysis of Gas-Phase Chemical Kinetics // SAND-89-8009. — Sandia National Labs, Livermore, CA, USA, 1989.
6. Hartlieb A. T., Atakan B., Kohse-Höinghaus K. Effects of a sampling quartz nozzle on the flame structure of a fuel-rich low-pressure propene flame // *Combust. Flame.* — 2000. — V. 121, N 4. — P. 610–624.
7. Struckmeier U., Oswald P., Kasper T., Böhlting L., Heusing M., Köhler M., Brockhinke A., Kohse-Höinghaus K. Sampling probe influences on temperature and species concentrations in molecular beam mass spectroscopic investigations of flat premixed low-pressure flames // *Z. für Phys. Chem.* — 2009. — Bd 223, N 4–5. — S. 503–537.
8. Hansen N., Tranter R. S., Moshhammer K., Randazzo J. B., Lockhart J. P. A., Fugazzi P. G., Tao T., Kastengren A. L. 2D-imaging of sampling-probe perturbations in laminar premixed flames using Kr X-ray fluorescence // *Combust. Flame.* — 2017. — V. 181. — P. 214–224.
9. Skovorodko P. A., Tereshchenko A. G., Korobeinichev O. P., Knyazkov D. A., Shmakov A. G. Experimental and numerical study of probe-induced perturbations of the flame structure // *Combust. Theory Model.* — 2013. — V. 17, N 1. — P. 1–24.
10. Deng L., Kempf A., Hasemann O., Korobeinichev O. P., Wlokas I. Investigation of the sampling nozzle effect on laminar flat flames // *Combust. Flame.* — 2015. — V. 162, N 5. — P. 1737–1747.
11. Gerasimov I. E., Knyazkov D. A., Yakimov S. A., Bolshova T. A., Shmakov A. G., Korobeinichev O. P. Structure of atmospheric-pressure fuel-rich premixed ethylene flame with and without ethanol // *Combust. Flame.* — 2012. — V. 159, N 5. — P. 1840–1850.
12. Dmitriev A. M., Knyazkov D. A., Bolshova T. A., Tereshchenko A. G., Paletsky A. A., Shmakov A. G., Korobeinichev O. P. Structure of CH<sub>4</sub>/O<sub>2</sub>/Ar flames at elevated pressures

- studied by flame sampling molecular beam mass spectrometry and numerical simulation // *Combust. Flame.* — 2015. — V. 162, N 10. — P. 3946–3959.
13. **Лобода Е. Л., Рейно В. В., Агафонцев М. В.** Выбор спектрального интервала для измерения полей температуры в пламени и регистрации экранированных пламенем высокотемпературных объектов с применением методов ИК-диагностики // *Изв. вузов. Физика.* — 2015. — Т. 58, № 2. — С. 124–128.
  14. **Loboda E. L., Reyno V. V., Vavilov V. P.** The use of infrared thermography to study the optical characteristics of flames from burning vegetation // *Infrared Phys. Technol.* — 2014. — V. 67. — P. 566–573.
  15. **Kaskan W. E.** The dependence of flame temperature on mass burning velocity // *Proc. Combust. Inst.* — 1957. — V. 6, N 1. — P. 134–143.
  16. **Варгафтик Н. Б.** Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. — М.: Наука, 1972.
  17. **Skovorodko P. A., Tereshchenko A. G., Knyazkov D. A., Paletsky A. A., Korobeinichev O. P.** Experimental and numerical study of thermocouple-induced perturbations of the methane flame structure // *Combust. Flame.* — 2012. — V. 159, N 3. — P. 1009–1015.

*Поступила в редакцию 15.04.2018.*

*После доработки 25.07.2018.*

*Принята к публикации 12.09.2018.*

---