

Влияние газодинамического и теплового взаимодействия термопары с пламенем на профиль измеряемой температуры во фронте пламени

А.Г. Терещенко

Институт химической кинетики и горения СО РАН, Новосибирск, Россия
e-mail: tereshag@kinetics.nsc.ru

П.А. Сковородко

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

Д.А. Князьков, А.А. Палецкий, О.П. Коробейничев

Институт химической кинетики и горения СО РАН, Новосибирск, Россия

В работе представлены результаты экспериментального и численного исследования влияния взаимодействия термопары с пламенем на профиль измеряемой температуры во фронте пламени.

Введение. Термопары широко используются при экспериментальном изучении тепловой структуры пламени. Знание температурного профиля позволяет рассчитать скорость тепловыделения в различных зонах пламени, установить ведущие стадии процесса горения, необходимые для понимания механизма и разработки модели горения. Измеренный температурный профиль используют в качестве входного параметра при моделировании структуры пламени с использованием сложных механизмов химических реакций. Определение тепловой структуры пламени с высокой точностью является одной из важнейших задач в исследовании процессов горения.

Важным параметром, характеризующим термопару, является ее пространственное разрешение, определяемое формой и размером ее поперечного сечения (круглая, либо ленточная термопары). Обычно предполагается, что пространственное разрешение круглой термопары определяется её диаметром, а ленточной – её толщиной, однако, вопросу о возмущениях потока ленточной термопарой, связанных с её шириной, и обусловленного ими влияния на показания термопары, до сих пор в литературе внимания не уделялось.

Одна из целей настоящей работы – изучить возмущения газового потока, вызываемые присутствием термопары в пламени, и определить, как эти возмущения влияют на результаты термопарных измерений. Для этого с помощью термопар различной формы измерены профили температуры в пламени. Для определения температурного профиля в невозмущённом пламени проведено моделирование тепловой структуры пламени метана с помощью кода PREMIX [1] из программного пакета CHEMKIN II [2] с использованием детального механизма GRI-Mech 3.0 химических реакций окисления метана [3]. При проведении расчета все параметры и условия (состав смеси, начальная температура смеси, массовый расход, давление) были заданы такими же, как в эксперименте. Проведено моделирование внешнего течения газового потока около термопары в рамках полной системы нестационарных уравнений Навье-Стокса с источниковым членом в уравнении энергии. Отсутствие в литературе подобных расчетов может быть связано с проблемами моделирования течения химически реагирующей смеси газов около термопары, обусловленными низкими значениями чисел Маха, характерными для подобных течений. Так, для пламени метана при атмосферном давлении число Маха в потоке находится в диапазоне

$4 \cdot 10^{-4} \div 10^{-3}$, т. е. поток является существенно дозвуковым, что затрудняет его описание в рамках полной системы нестационарных уравнений Навье-Стокса [4]. Другой причиной недостаточного внимания к обсуждаемой проблеме может быть большое число факторов, оказывающих влияние на корректность термодинамических измерений в пламенах газовых и особенно конденсированных систем (КС) [5, 6], на фоне которых выделить возмущения структуры пламени, вызываемые собственно термопарой, затруднительно.

1. Методика эксперимента. Пламя предварительно перемешанной смеси $\text{CH}_4 + \text{O}_2 + \text{Ar}$ (6/15/79 об. %) стабилизировалось на плоской горелке при атмосферном давлении. Верхняя часть горелки выполнена из латунного цилиндра диаметром 16 мм и высотой 5 мм, изготовленного из спечённых сфер диаметром ~ 0.1 мм. Пористость латунного цилиндра составляла $\sim 40\%$. Температура поверхности горелки поддерживалась равной 368 К с помощью термостата. Расход горючей смеси составлял $25 \text{ см}^3/\text{с}$ при нормальных условиях. Измерение профилей температуры проводилось с использованием трех Pt/Pt+10%Rh термопар (ТП1-3) различной формы покрытых тонким (толщина $2 \div 3$ мкм) слоем SiO_2 . Термопара ТП1 – круглая диаметром 24 мкм. Термопары ТП2-3 – ленточные с размерами поперечного сечения 10×110 мкм (ТП2) и 20×125 мкм (ТП3). Растягивающая конструкция подводящих концов термопары обеспечивала параллельность рабочего участка термопары поверхности горелки и предотвращала его деформацию. Ленточные термопары устанавливались широкой частью параллельно поверхности горелки. Погрешность измерений показаний термопар находилась в пределах ± 30 К.

2. Результаты измерений. На рис. 1 приведены результаты измерений, полученные с помощью термопары ТП3 без введения поправок на потери термопарой тепла излучением. Кривая 2 на этом рисунке – невозмущенный профиль температуры (T_{CH_4}), рассчитанный с помощью программы PREMIX. В области температур примерно от 800 до 1100 К для всех термопар наблюдается эффект превышения измеренной термопарами температуры над температурой невозмущённого пламени (в дальнейшем этот эффект для краткости будем называть “перегревом”). Разброс данных в этой области для ТП3 (так же, как и для ТП1 и ТП2) по оси абсцисс составил примерно ± 10 мкм, по оси ординат – $\pm (15-20 \text{ К})$.

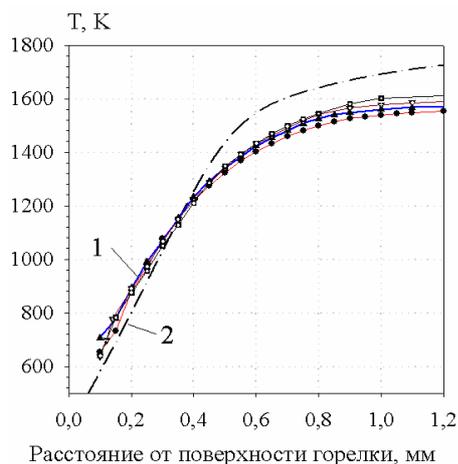


Рис. 1. Температурные профили в пламени метана. 1- пучок кривых с точками - первичные экспериментальные профили $T_{\text{ТП3}}$ без учёта потерь тепла излучением. 2 – невозмущённый профиль

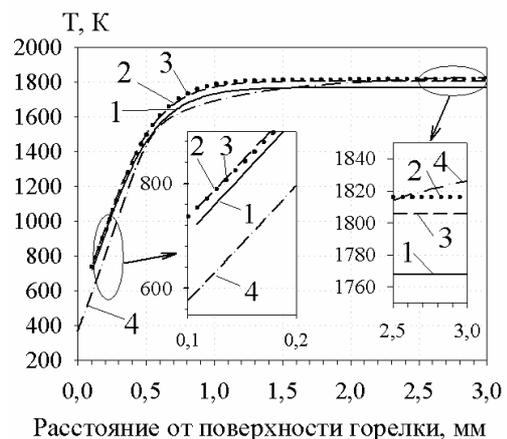


Рис. 2. Сравнение профилей температуры, полученных с учетом потерь тепла излучением, с невозмущённым профилем. 1 (сплошная линия) – $T_{\text{ТП1}}^*$, 2 (точки) – $T_{\text{ТП2}}^*$, 3 (пунктир) – $T_{\text{ТП3}}^*$, 4 – T_{CH_4} (невозмущённый профиль)

Чтобы установить, как в зоне продуктов горения измеренная температура согласуется с температурой невозмущенного пламени, были рассчитаны температурные поправки на теплотери за счет излучения по формуле, предложенной в [7] для случая поперечного обтекания цилиндра. Температурный профиль с поправкой на потери тепла излучением будем обозначать как T^* . Степень черноты поверхности термопары $\varepsilon(T)$, принятая такой же, как для кварца, аппроксимировалась соотношением (температура (T) выражена в градусах Кельвина):

$$\varepsilon(T) = 0.163297 + 0.766332 / (1 + \exp((T - 583.467752) / 146.53391))^{0.317496} \quad (1)$$

На рис. 2 показаны профили температуры $T^*_{ТП(1-3)}$, с учетом поправки на влияние излучения, рассчитанной по формуле из работы [7], а также невозмущенный профиль температуры. Как видно из рис. 2, в области фронта пламени от 0.1 мм до 0.5 мм “перегрев” составляет 120 - 150 К на расстоянии 0.2 мм. Обнаруженный эффект “перегрева” в области температурного градиента существенно влияет на величину этого градиента. Анализ данных, приведённых на рис. 1 и 2, показывает, что эффект перегрева, регистрируемый термопарой, приводит к “увеличению” температурного градиента у поверхности горелки на ~ 50% (при экстраполяции измеренной температуры к температуре поверхности горелки) по сравнению с градиентом в невозмущённом пламени.

Поскольку эффект “перегрева”, обнаруженный в области температурного градиента, наблюдался для всех используемых термопар, его дальнейшее исследование путем моделирования течения было проведено только для ленточной термопары ТПЗ.

3. Численное моделирование течения. Моделирование плоского внешнего течения около термопары, помещенной в поток на некотором расстоянии от поверхности горелки (или поверхности горения в случае пламени КС), осуществлялось в рамках полной системы нестационарных уравнений Навье-Стокса. Конечно-разностная аппроксимация исходных уравнений проводилась на гибридной (разнесенной) разностной сетке, что позволило разработать эффективный алгоритм моделирования течений вязкого газа. Для приближенного учета влияния тепловыделения вследствие химических реакций в уравнение энергии добавлялся источниковый член Q , обеспечивающий заданное распределение температуры в плоском невозмущенном изобарическом пламени, т. е. в отсутствие термопары в пламени. Детальное описание алгоритма дано в работе [8].

Течение моделировалось в области прямоугольной формы. Начальное распределение параметров в области моделирования задавалось таким же, как в невозмущенном пламени. Наличие термопары возмущает это распределение из-за присутствия твердых поверхностей в поле течения, а также теплообмена между газом и поверхностью термопары, температура которой определяется в процессе счета. Вследствие влияния указанных факторов поток начинает перестраиваться и спустя некоторое время достигает стационарного состояния.

Расчеты проводились применительно к пламени метана, которое использовалось в наших экспериментах, а также к пламени гексогена при давлении 20 атм [9]. Наряду с подходом с пространственно закрепленными источниками ($Q(x)$), использовавшимся в работе [8], в данной работе применялся также другой подход, в котором источниковый член определяется локальной температурой в потоке ($Q(T)$), что представляется более адекватным с точки зрения описания нелинейных эффектов взаимного влияния химических и газодинамических процессов. Распределение температуры в невозмущенном пламени хорошо воспроизводится в рамках любого из этих подходов.

3.1. Пламя метана при атмосферном давлении. На рис. 3 для ленточной термопары ТПЗ показаны расчетные профили перегрева ($\Delta T = T - T_{CH_4}$) для двух случаев. В

первом случае (кривые 1, 2) в расчётах полагалось, что термопара не имеет потерь тепла излучением ($\epsilon = 0$) и находится, следовательно, в адиабатических условиях, во втором случае (кривые 3, 4) степень черноты термопары принималась равной $\epsilon(T)$ согласно (1), при этом данные моделирования можно непосредственно сравнивать с исходными показаниями термопары без введения для неё поправки на потери тепла излучением (кривая 5).

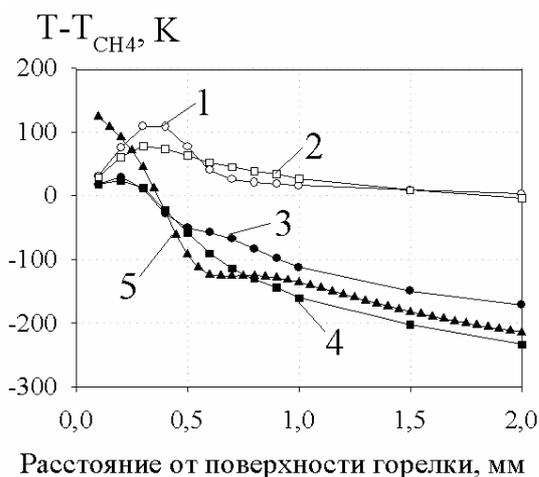


Рис. 3. Величины перегрева термопарных профилей в пламени метана. Расчетные (кривые 1 – 4) и экспериментальный (кривая 5) профили. 1 – $Q(T)$, $\epsilon = 0$; 2 – $Q(x)$, $\epsilon = 0$; 3 – $Q(T)$, $\epsilon = \epsilon(T)$; 4 – $Q(x)$, $\epsilon = \epsilon(T)$.

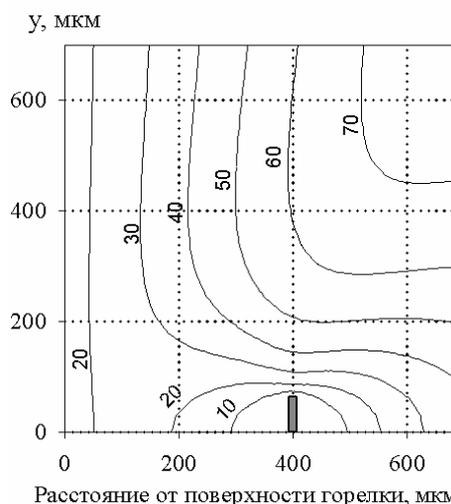


Рис. 4. Поле продольных скоростей (см/с) в пламени метана при обтекании термопары ППЗ.

Как видно из рис. 3, при $\epsilon = 0$ в области температурного градиента наблюдается перегрев, который достигает значения 109 К для модели с $Q(T)$ и 78 К для модели с $Q(x)$ при $x \sim 0.3 \div 0.4$ мм. Во втором случае вследствие радиационных потерь тепла термопарой расчетные профили перегрева для $\epsilon = \epsilon(T)$ отрицательны почти всюду, за исключением области малых расстояний от горелки (≤ 0.3 мм). Экспериментальные данные (кривая 5) близки к расчетным, полученным при учете влияния уноса тепла излучением с поверхности термопары с $\epsilon = \epsilon(T)$ (кривые 3, 4) начиная с расстояния ≥ 0.3 мм. Причины значительного перегрева, наблюдающегося в эксперименте на расстояниях < 0.3 мм от горелки, не ясны.

На рис. 4 представлено расчетное поле продольных скоростей, полученное для $\epsilon = 0$ и модели с источником в виде $Q(T)$ для расстояния термопары от поверхности горелки 0.4 мм, которое соответствует перегреву термопары, близкому к максимальному и составляющему 108 К (см. кривую 1 на рис. 3). Поток на рис. 4 движется слева направо. Как видно из рис. 4, в окрестности термопары формируется зона торможения потока протяженностью ~ 500 мкм, что составляет около половины ширины фронта горения в рассматриваемом пламени (~ 1 мм). Таким образом, термопара формирует зону торможения и в то же время отражает температуру в этой возмущенной зоне. Поскольку термопара стоит в газовом потоке с интенсивным тепловыделением за счёт химических реакций, в области расположения термопары нарушается баланс между тепловыделением и уносом тепла за счёт оттока продуктов от поверхности горения, а также за счет теплопроводности. Нарушение этого баланса, характерного для невозмущенного пламени, приводит к возмущению поля

изотерм в окрестности термопары, в результате чего термопара оказывается в области с более высокой температурой (на ~ 100 K) по сравнению с температурой невозмущенного пламени на данном расстоянии от горелки, что находит отражение в ее показаниях.

3.2 Пламя гексогена при давлении 20 атмосфер. При изучении влияния формы термопары на температурный профиль в пламени КС в качестве объекта исследования было выбрано пламя гексогена при давлении 20 атм с массовым потоком $0.83 \text{ г/см}^2\text{с}$ [9]. Измеренный температурный профиль для этого пламени, приведённый в [9], в дальнейшем будет рассматриваться как невозмущенный – $T_{\text{RDХ}}$. Исследование эффекта возмущения термопарой структуры потока, в котором она находится, было проведено для термопар двух форм с мало отличающейся площадью поперечного сечения: ленточной, с поперечным сечением 3×60 мкм – ТП4, которая использовалась в работе [9], а также близкой к квадратной – ТП5, с сечением 13×14 мкм.

Результаты расчета профилей температуры для термопар ТП4 и ТП5, полученные для $\epsilon = 0$, даны на рис. 5, где кривая 1 – невозмущенный профиль $T_{\text{RDХ}}$, кривые 2 и 3 – показания ТП4, кривая 4 – показания ТП5. Для более детального анализа возмущений температуры, вызванных термопарой, на рис. 5 приведены также значения перегревов ($\Delta T = T - T_{\text{RDХ}}$) профилей 2 – 4 (кривые 5 – 7, соответственно). Из рисунка видно, что перегревы термопары ТП4 существенно выше, чем для термопары ТП5. Наибольшая величина перегрева ленточной термопары $\Delta T_{\text{ТП4}}$ составляет 442 K, в то время как максимальный перегрев термопары $\Delta T_{\text{ТП5}}$ – 198 K.



Рис. 5. Температурные профили в пламени гексогена, рассчитанные для двух термопар различной формы с близкой площадью поперечного сечения. 1 – $T_{\text{RDХ}}$; 2 – $Q(T)$, 3 – $Q(x)$ для $T_{\text{ТП4}}$ (3×60 мкм); 4 – $Q(T)$ для $T_{\text{ТП5}}$ (13×14 мкм); 5-7 – $\Delta T_{2,4}$, соответственно.

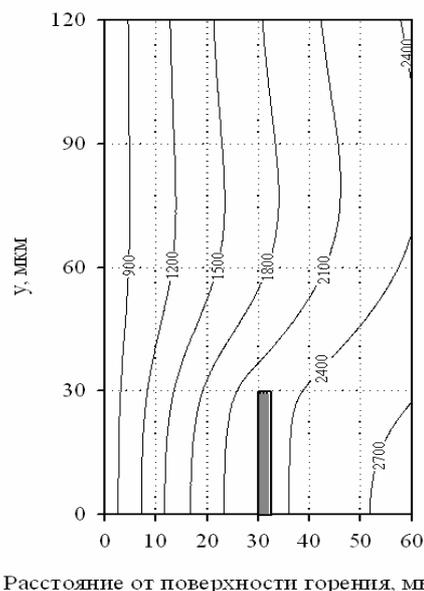


Рис. 6. Поле изотерм (K) в пламени гексогена при обтекании термопары ТП4.

На рис. 6 представлено расчетное поле изотерм полученное для $\epsilon = 0$ и модели с источниковым членом в виде $Q(T)$ для варианта обтекания ленточной термопары ТП4. Этот вариант определяющих параметров соответствует перегреву термопары (см. кривую 5 на рис. 5), близкому к максимальному (442 K) и составляющему 410 K. В окрестности термопары, помещенной в пламя гексогена, также формируется локальная зона торможения потока газа, с

гораздо большим, однако, чем в метановом пламени, уровне возмущений потока. Возмущения температурного поля, вызванные термопарой (см. рис. 6), также весьма очевидны и подобны тем, что имеют место в пламени метана, однако выражены они значительно более ярко.

Выводы.

1. Температурный профиль в области температурного градиента, измеренный с помощью термопар различной формы в атмосферном пламени метана с учётом радиационной поправки, показал превышение измеренной температуры над расчётной температурой невозмущённого пламени.
2. Возмущение пламени термопарой в области температурного градиента у поверхности горелки может приводить к изменению величины этого градиента по сравнению с его величиной в невозмущённом пламени.
3. Моделирование внешнего течения продуктов горения около термопары в области температурного градиента показало, что торможение потока реагирующих газов в окрестности термопары приводит к локальному увеличению тепловыделения вследствие химических реакций и соответствующему повышению температуры термопары относительно невозмущённого значения.
4. Величина эффекта растёт с увеличением массового расхода газа в пламени и ширины термопары. Ленточные термопары приводят к более существенному завышению измеряемой температуры, чем круглые при одинаковой площади поперечного сечения термопары.

Список литературы

- [1] R.J. Kee, J.F. Grcar, M.D. Smooke, J.A. Miller. A Fortran program for modeling steady laminar 1-D premixed flames // Sandia National Laboratories Report. SAND85-8240. 1985.
- [2] R.J. Kee, F.M. Rupley, and J.A. Miller. CHEMKIN-II: A Fortran Chemical Kinetics Package for the Analysis of Gas Phase Chemical Kinetics // Sandia National Laboratories Report. SAND89 - 8009B. 1989.
- [3] http://www.me.berkeley.edu/gri_mech/.
- [4] Ю. В. Лапин, М. Х. Стрелец. Внутренние течения газовых смесей // М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1989. – 368с.
- [5] А.А. Зенин. О теплообмене микротермопар в условиях горения конденсированных веществ // Журнал прикладной механики и технической физики. 1963, № 5, С. 125 – 131.
- [6] А.А. Зенин, С.В. Финяков. Исследование механизма горения гексогена и октогена различными экспериментальными методиками // Физика горения и взрыва. 2009, Т. 45, № 5, С. 60-81.
- [7] W.E. Kaskan. The Dependence of Flame Temperature on Mass Burning Velocity // Sixth Symposium (International) on Combustion. Reinhold. 1957. P. 134 - 143.
- [8] П. А. Сковородко, А. Г. Терещенко, О.П. Коробейничев, Д.А. Князьков, А.Г. Шмаков. Исследование возмущений, вносимых в пламя пробоотборным зондом. I. Возмущения газодинамической структуры течения // Хим. физика. 2006. Т. 25, № 10, С. 23-32.
- [9] A.A. Zenin. HMX and RDX: Combustion mechanism and influence on modern double-base propellant combustion // J. Propulsion and Power. 1995. Vol. 11, N. 4, P. 752-758.