

# 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 термометрических 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  $\sim 0.1$  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  $\text{SiO}_2$ . Термопара ТП1 – круглая диаметром 24 мкм. Термопары ТП2-3 – ленточные с размерами поперечного сечения  $10 \times 110$  мкм (ТП2) и  $20 \times 125$  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  $\pm 30$  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 ( $T_{\text{CH}_4}$ ), 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  $\pm 10$  мкм, по оси ординат –  $\pm (15-20 \text{ К})$ .

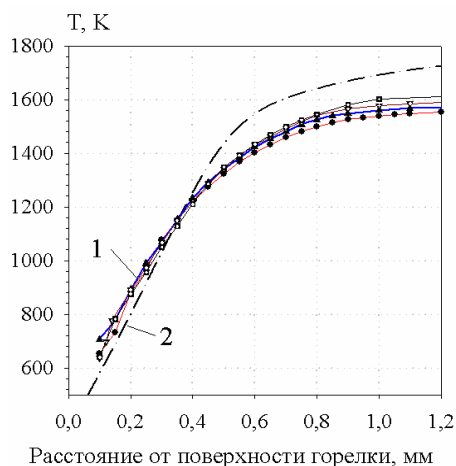


Рис. 1. Температурные профили в пламени метана. 1- пучок кривых с точками - первичные экспериментальные профили  $T_{\text{ТП3}}$  без учёта потерь тепла излучением. 2 – невозмущённый профиль

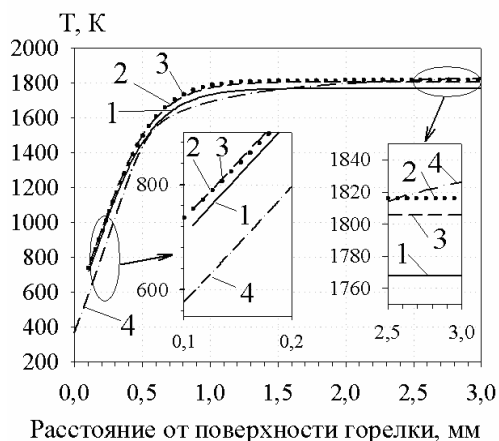


Рис. 2. Сравнение профилей температуры, полученных с учетом потерь тепла излучением, с невозмущённым профилем. 1 (сплошная линия) –  $T_{\text{ТП1}}^*$ , 2 (точки) –  $T_{\text{ТП2}}^*$ , 3 (пунктир) –  $T_{\text{ТП3}}^*$ , 4 –  $T_{\text{CH}_4}$  (невозмущённый профиль)

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).

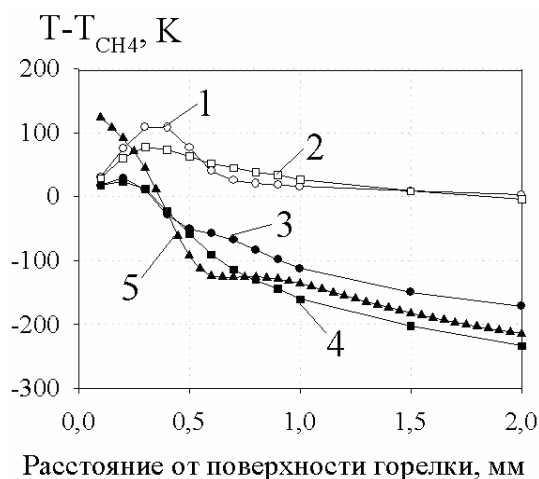


Рис. 3. Величины перегрева термопарных профилей в пламени метана. Расчетные (кривые 1 – 4) и экспериментальный (кривая 5) профили. 1 –  $Q(T)$ ,  $\epsilon = 0$ ; 2 –  $Q(x)$ ,  $\epsilon = 0$ ; 3 –  $Q(T)$ ,  $\epsilon = \epsilon(T)$ ; 4 –  $Q(x)$ ,  $\epsilon = \epsilon(T)$ .

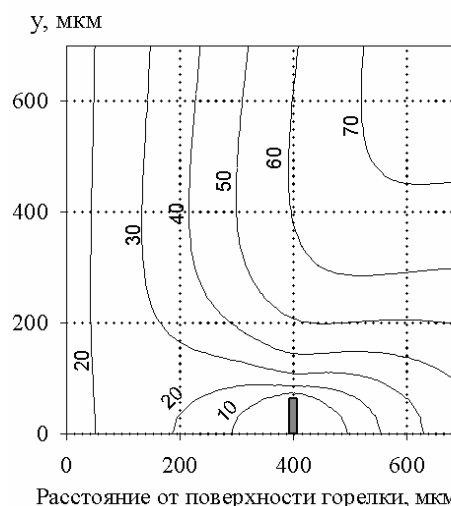


Рис. 4. Поле продольных скоростей (см/с) в пламени метана при обтекании термопары ППЗ.

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 ( $\leq 0.3$  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  $\geq 0.3$  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 источниковым членом 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 протяжённостью  $\sim 500$  мкм, что составляет около половины ширины фронта горения в рассматриваемом пламени ( $\sim 1$  мм). Таким образом, термопара формирует зону торможения и в то же время отражает температуру в этой возмущённой 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 невозмущённого пламени, приводит к возмущению поля

изотерм в окрестности термопары, в результате чего термопара оказывается в области с более высокой температурой (на  $\sim 100$  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  $3 \times 60$  мкм – ТП4, которая использовалась в работе [9], а также близкой к квадратной – ТП5, с сечением  $13 \times 14$  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  $T_{\text{ТП4}}$  ( $3 \times 60$  мкм); 4 –  $Q(T)$  для  $T_{\text{ТП5}}$  ( $13 \times 14$  мкм); 5-7 –  $\Delta T_{2,4}$ , соответственно.

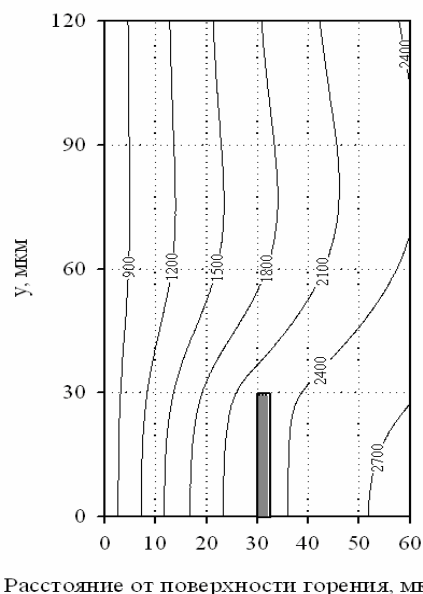


Рис. 6. Поле изотерм (K) в пламени гексогена при обтекании термопары ТП4.

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/](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.