

ТРАКТОВКА СИСТЕМАТИЧЕСКИХ ОШИБОК ПРИ КОНТАКТНЫХ ИЗМЕРЕНИЯХ КОНЦЕНТРАЦИИ И ТЕМПЕРАТУРЫ

Р. Пайн

Немецкий аэрокосмический центр, 74239 Хартхаузен, Германия

Рассмотрены типичные систематические ошибки, возникающие при контактных измерениях температуры и концентрации в камерах сгорания. Для того чтобы уменьшить ошибки, нужно обеспечить быстрое гашение горящих газов и замораживание состава продуктов сгорания. Анализ выполнен посредством простой аналитической модели теплопередачи в зонде, результаты представлены в виде температурно-временных зависимостей, профилей температуры и скоростей гашения внутри зонда. Проверка корректности результатов измерения проводится на основе соблюдения материального баланса (сохранения количества атомов). Подробно описаны основные ошибки высокотемпературных термпарных измерений, особое внимание уделено поправкам на излучение.

ВВЕДЕНИЕ

Измерение распределений концентраций газовых компонентов, температуры и скорости в камерах сгорания важно для аэрокосмических приложений. Точное знание этих характеристик необходимо для определения зон реакции, эффективности смешения и горения, а также для оценки загрязнения окружающей среды при использовании ракетных и прямоточных воздушно-реактивных двигателей. Результаты исследований помогут глубже понять процесс горения, что позволит улучшить конструкции исследуемых двигателей, и, кроме того, предоставляется возможность проверить существующие компьютерные программы. Это, в свою очередь, должно уменьшить число натурных испытаний и, как следствие, стоимость работ.

Развитие методов измерения начиналось с контактных методов диагностики, таких как отбор проб газа, измерение давления, термпарные измерения, измерение теплового потока с помощью калориметрического датчика и т. д., и лишь позднее стали развиваться бесконтактные методы — CARS, LIF, FT-IR и другие методы спектроскопии. Хотя современные бесконтактные методы дают лучшее понимание деталей процесса горения, контактные (возмущающие) методы (например, датчики для аппаратуры) продолжают использоваться и разрабатываться, в первую очередь, из-за низкой цены и простоты обращения в условиях испытательного стенда. Однако, при использовании этих методов не следует забы-

вать о возможности серьезных систематических ошибок, которые, кстати, существуют и в бесконтактных методах. Данная же работа посвящена анализу некоторых типов систематических ошибок именно контактных методов.

1. ИЗМЕРЕНИЕ КОМПОНЕНТНОГО СОСТАВА

1.1. Общие замечания

Во многих контактных методах измерения компонентного состава сначала необходимо осуществить отбор проб из исследуемой системы. Это чрезвычайно важная операция, так как результаты анализа могут сильно зависеть от размеров и пространственного расположения отборника и способа сохранения и извлечения пробы. Каждая проба осреднена по времени отбора, а если исследуемый объект характеризуется высокими градиентами концентрации, то и по объему. Если требуется определить локальные профили концентрации, пробы должны быть малы по сравнению с габаритами исследуемой системы. Результаты, полученные по отобраным образцам, перенесенным в лабораторию, часто удивляют исследователей, не обративших должного внимания на условия, при которых были взяты пробы. Таким образом, диалог между экспериментатором или инженером и аналитиком очень важен. Следующий параграф посвящен анализу наиболее распространенных систематических ошибок при отборе газа для анализа.

1.2. Отбор газовых проб

Отбор газа часто выполняется с помощью очень тонких металлических или кварцевых капиллярных трубок. Если в потоке, из которого отбирают пробы, не происходит горения, то сложных проблем с такими устройствами не возникает. Ошибки могут появиться из-за возмущений потока, вызванных зондом, однако зонды могут быть сделаны очень малыми (диаметром, как у иглы шприца). Иногда для одновременного отбора проб из нескольких мест используются группы зондов, и это, естественно, приводит к большим возмущениям потока, так что одиночные зонды, помещенные в разные места, дают более точные результаты.

Очень важный момент, которым часто пренебрегают, — осуществление так называемого изокINETического отбора. Чтобы предотвратить возмущения потока, входная часть зонда должна быть установлена параллельно потоку, а скорость всасывания должна быть равной скорости потока. Этого можно добиться включением расходомера в трассу всасывания. При изокINETическом методе не возникает ошибок, связанных с образованием стока газа и отбором газа из областей, далеко отстоящих от отверстия зонда. При высокоточных измерениях всегда используют изокINETический отбор или, по крайней мере, изучают влияние скорости всасывания на результаты анализа исследуемого газа.

Ситуация намного сложнее в потоках с горением. Чтобы избежать разрушения материала, используют зонды с водяным охлаждением. Внешний диаметр такого зонда из-за охлаждающей рубашки гораздо больше, чем у зонда, предназначенного для холодного потока. Поэтому его влияние на картину течения намного сильнее. Зонды этого типа имеют внешний диаметр до 1,5 мм и должны охлаждаться водой под давлением. Некоторые из них были разработаны Греем [1] и выпускаются серийно. Зонды этого типа используются для измерения температуры в средах с $T > 8000$ К, где термометры уже не могут применяться. Основные ошибки измерения подобными зондами связаны с так называемой скоростью гашения. В высокотемпературной среде продуктов горения химические реакции идут чрезвычайно быстро, и для точного определения концентраций компонентов смесь должна быть мгновенно заморожена при отборе газа. Таким образом, для каждой используемой системы требуется оцен-

ка гасящей способности зонда. Анализ скорости гашения для малого элемента объема пробы газа проводится в следующих предположениях.

1. Поток внутри зонда рассматривается как одномерный.
2. Стенки зонда имеют постоянную температуру.
3. Внутри зонда не происходит никаких химических реакций.
4. Свойства материалов постоянны и не зависят от температуры.

Поток тепла, входящий в малый элемент объема пробы dV , выражается соотношением

$$Q_1 = mc_p T, \quad (1)$$

где m — массовый расход, c_p — удельная теплоемкость. Поток тепла, выходящий из малого элемента объема dV , записывается следующим образом:

$$Q_2 = mc_p(T - dT). \quad (2)$$

Тепловой поток в охлаждающую рубашку равен

$$Q_3 = \alpha dF(T - T_w), \quad (3)$$

где α — коэффициент теплоотдачи, F — площадь поверхности, T_w — температура стенки. Вследствие теплообмена температура газа уменьшается на малую величину dT на расстоянии dz :

$$\alpha dF(T - T_w) = -mc_p dT. \quad (4)$$

Используя очевидные соотношения

$$dF = 2\pi r dz, \quad w = m/\rho\pi r^2, \quad w = dz/dt,$$

$$dF = \frac{2m}{\rho} dt,$$

где r — радиус канала, w — скорость газа, ρ — плотность газа, преобразуем уравнение (4) к виду

$$\frac{2\alpha}{\rho} dt(T - T_w) = -c_p dT. \quad (5)$$

Отсюда получаем обыкновенное дифференциальное уравнение для скорости остывания dT/dt :

$$-\frac{dT}{dt} = \frac{2\alpha}{\rho c_p} T(T - T_w). \quad (6)$$

С учетом уравнения состояния идеального газа $\rho = pM/RT$, где p — давление, R — универсальная газовая постоянная, M — средняя молярная масса, имеем

$$-\frac{dT}{dt} = \frac{2\alpha RT}{pMrc_p}(T - T_w). \quad (7)$$

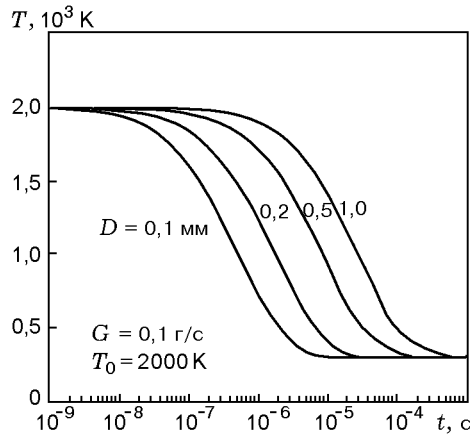


Рис. 1. Зависимость температуры отобранной пробы от времени для зондов различного диаметра

Решения с соответствующими начальными условиями имеют вид

$$T = \frac{T_w}{1 - \left(1 - \frac{T_w}{T_0}\right) \exp\left(-\frac{2\alpha R T_w t}{p M r c_p}\right)}, \quad (8)$$

где t — время охлаждения, T_0 — начальная температура газа. Число Нуссельта задается соотношением [2]

$$\text{Nu} = 3,66 + \frac{0,104 \text{Re Pr } D/z}{1 + 0,16(\text{Re Pr } D/z)^{0,8}}, \quad (9)$$

где Re , Pr — соответственно числа Рейнольдса и Прандтля. При $\text{Nu} = \alpha D/\lambda$ и $D = 2r$ получаем

$$T = \frac{T_w}{1 - \left(1 - \frac{T_w}{T_0}\right) \exp\left(-\frac{4\lambda \text{Nu } R T_w t}{p M r c_p D^2}\right)}, \quad (10)$$

где λ — теплопроводность газа.

Температурно-временные зависимости для процесса охлаждения внутри зонда, вычисленные по уравнению (10), показаны на рис. 1. Температура пробы, первоначально равная $T_0 = 2000$ К, быстро уменьшается во времени, особенно в очень тонких зондах. Так, для зонда диаметром $D = 0,1$ мм спустя 10^{-4} с температура снижается до 298 К, т. е. до температуры стенок отборника. Для зонда диаметром $D = 1$ мм время остывания газа будет на два порядка больше.

На рис. 2 показаны профили температур вдоль оси отборника при $T_0 = 2000$ К, соответствующие двум массовым расходам (G). Для снижения температуры до 500 К при $G = 0,1$ г/с длина зонда должна быть ≈ 20 см. Увеличение массового расхода изменяет профиль

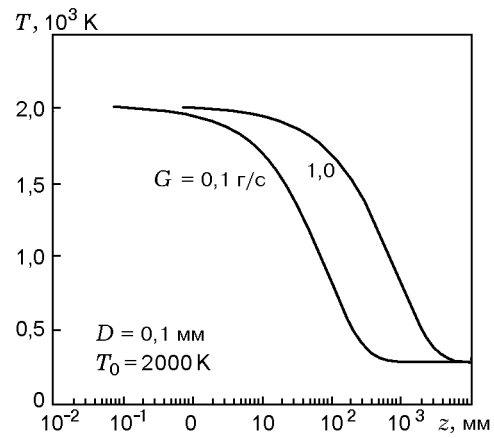


Рис. 2. Температурные профили в зонде для разных массовых расходов

остывания и для существенного снижения температуры требуется увеличение длины зонда. При $G = 1$ г/с длина зонда должна быть чрезвычайно большой.

На рис. 3 показана зависимость скорости охлаждения, вычисленная по уравнению (7). Вначале скорость охлаждения велика и достигает 10^{10} К/с для зонда с $D = 0,1$ мм. Скорость остается очень большой до тех пор, пока температура не понизится до 500 К, что достигается спустя 10^{-5} с. Примерно в этот же момент времени две кривые пересекаются, после чего скорость охлаждения в зонде с $D = 1$ мм становится выше. Это происходит из-за того, что в этот момент времени температура в зонде с $D = 1$ мм все еще остается ≈ 1800 К. Скорость охлаждения стремится к нулю, когда температура газа приближается к температуре стенок.

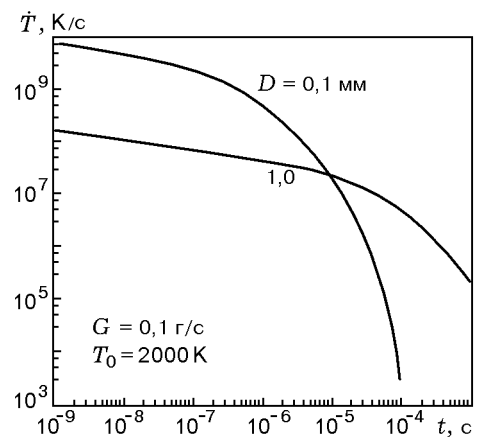


Рис. 3. Зависимость скорости охлаждения от времени для зондов различного диаметра

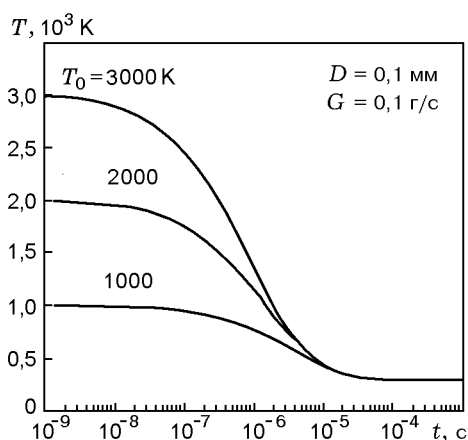


Рис. 4. Зависимость температуры от времени в зонде для различных начальных температур пробы

На рис. 4 представлены кривые охлаждения газа в зонде для различных значений начальной температуры. Три кривые сближаются после $\approx 10^{-5}$ с. Скорость охлаждения растет с увеличением начальной температуры и для $T_0 \approx 3000$ К достигает весьма большого значения (до 10^{10} К/с).

В большинстве случаев продукты сгорания содержат большое количество воды. При проведении химического анализа присутствие воды может вызвать проблемы, обусловленные ее конденсацией в тонких трубопроводах, ведущих к приборам, например при вводе газа в газовый хроматограф. Следовательно, может потребоваться нагрев жидкости, охлаждающей зонд, выше точки росы для газовой смеси в отборнике, а также нагрев соединительной арматуры. Представляет интерес оценка влияния этих факторов на охлаждающую способность зонда.

Временные зависимости температуры газа в зонде при разных температурах его стенок показаны на рис. 5. Нетрудно заметить, что увеличение температуры стенок зонда практически не влияет на профиль температуры. Кривые остывания расходятся после $\approx 10^{-6}$ с, и затем каждая из них стремится к соответствующей температуре стенки. Воздействие на скорость охлаждения также невелико и проявляется лишь при $T < 1000$ К.

Для того чтобы оценить, является ли скорость охлаждения в малых зондах достаточно высокой, чтобы заморозить состав исследуемых продуктов сгорания, необходимо сравнить скорость охлаждения с характерным вре-

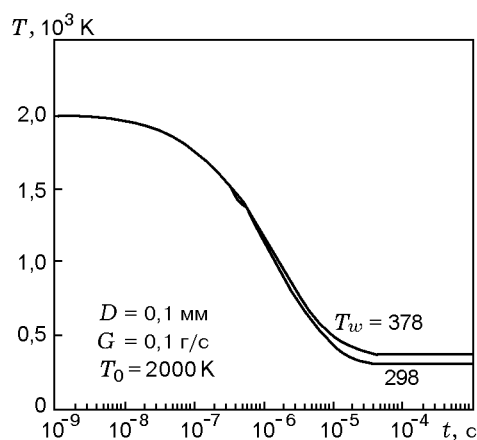


Рис. 5. Температурно-временная зависимость для отобранной пробы газа при вариации температуры стенок зонда

менем протекания химических реакций. В исследуемом диапазоне температур ($T < 2000$ К) химические реакции обычно завершаются за 10^{-2} с. Из рис. 1 видно, что примерно за такое же время для зонда с $D = 0,1$ мм температура пробы снижается до температуры стенок, причем уже через 10^{-5} с она становится ниже 500 К. Таким образом, зонды достаточно малого диаметра при умеренных массовых расходах способны быстро заморозить химический состав образца, за исключением случаев с высокой концентрацией радикалов (например, при очень высоких температурах). Реакции с участием радикалов очень быстры и часто протекают с нулевой энергией активации, поэтому их невозможно заморозить. В литературе имеется небольшое число теоретических и экспериментальных исследований, относящихся к рассматриваемой проблеме. В этой связи отметим работу [3], в которой исследовалось быстрое охлаждение сильно нагретого воздуха, а также эксперименты [4–6], в которых изучался отбор газа из зон пламени. Было показано, что при отборе из пламени составы с радикалами невозможно заморозить путем быстрого охлаждения. Авторы [6] показали, что ошибки могут иметь место также при определении малых количеств NO и CO, однако диаметр их зонда был, возможно, слишком велик, а скорость охлаждения недостаточна.

Расчетная зависимость компонентного состава воздуха при его быстром охлаждении начиная с температуры 4000 К в малоразмерном зонде представлена на рис. 6. В процессе охлаждения наблюдается значительное изменение концентраций O, O₂ и N, из чего следует, что

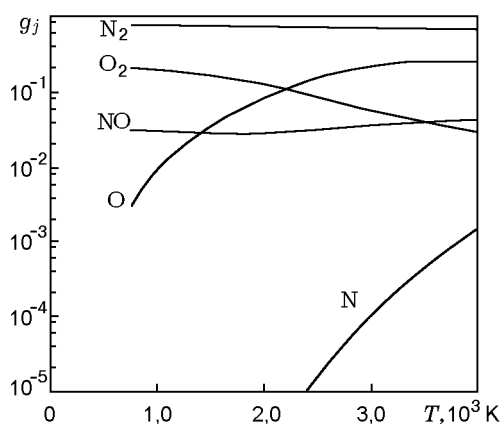


Рис. 6. Быстрое охлаждение воздуха с начальной температурой 4000 К (заимствовано из [3])

заморозить состав смеси при данных условиях невозможно (особенно в случае большого количества атомов кислорода, когда наблюдаются очень быстрые реакции рекомбинации при течении газа в зонде).

На рис. 7 представлены некоторые данные работы [6]. Проведено сравнение результатов измерений концентрации СО в газовой смеси, полученных с помощью перестраиваемого диодного лазера, и зондовых измерений с результатами расчетов по кинетической и равновесной моделям. Это сравнение со всей очевидностью показывает, что достаточно большая часть СО теряется в зонде, что объясняется окислением СО очень активным радикалом ОН в химической реакции $\text{CO} + \text{O} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}$ с образованием CO_2 . В случае высоких концентраций ОН, особенно в бедных пламенах, эта реакция не может быть подавлена в извлеченном зондом объеме газа и является основным каналом потери СО. Однако, согласно [6], результаты измерений с помощью перестраиваемого диодного лазера и с помощью зонда находятся в согласии в случае богатых (с избытком горючего) пламен. Авторы работ [4, 7] предполагают, что в этом случае имеющийся ОН расходуется в реакциях с относительным избытком несгоревших углеводородов и поэтому последующее превращение СО ингибируется.

Результаты измерений и вычислений, имеющиеся в литературе, указывают, что количество H_2O и CO_2 можно точно определить с помощью зонда. Измерение СО, как показано выше, можно проводить лишь в смесях с избытком горючего. В таких системах не так важна химическая реакция $\text{CO} + \text{O} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}$,

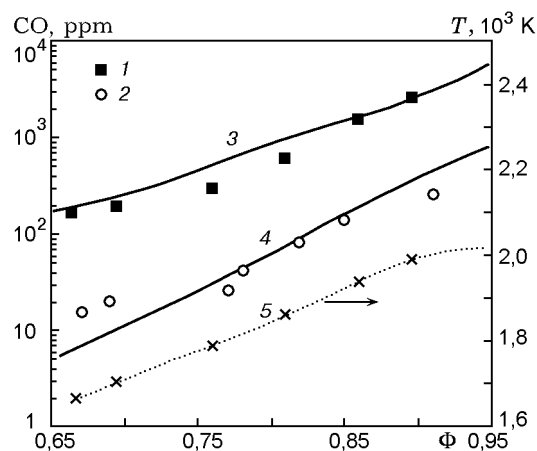


Рис. 7. Сравнение концентраций СО, измеренных методом абсорбционной спектроскопии (1) и с помощью зонда (2), со значениями, предсказанными кинетической моделью (3) и термодинамическим расчетом (4):

Φ — коэффициент избытка топлива, см. уравнения (11); 5 — измеренная температура

приводящая к потерям СО в процессе замораживания пробы. Также не следует удивляться имеющимся в литературе результатам, полученным для бедных систем, поскольку, например, в [6] использовался зонд с внутренним диаметром 4 мм (!), а зонд в работах [4, 5] имел диаметр 2,5 мм и длину неохлаждаемой трубки 7,5 см. Несмотря на то, что оба эти зонда имели добавочное аэродинамическое охлаждение кончика (внезапное расширение внутреннего канала), скорость охлаждения пробы в них была недостаточно большой по сравнению с требуемой, вычисленной выше.

1.3. Материальный баланс

Закон сохранения количества атомов должен выполняться в любых горящих системах. Это также означает, что заданные соотношения между элементами не изменяются в процессе горения. Например, если углеводород C_xH_y сожжен в некотором соотношении с воздухом, то основными продуктами сгорания будут O_2 , N_2 , H_2O , CO_2 и СО, а молярные отношения C/O , N/O и C/H постоянны и задаются начальным составом газа:

$$\frac{\text{C}}{\text{O}} = \frac{n_{\text{CO}_2} + n_{\text{CO}}}{2n_{\text{O}_2} + n_{\text{H}_2\text{O}} + 2n_{\text{CO}_2} + n_{\text{CO}}} = \Phi,$$

$$\frac{\text{N}}{\text{O}} = \frac{n_{\text{N}_2}}{2n_{\text{O}_2} + n_{\text{H}_2\text{O}} + 2n_{\text{CO}_2} + n_{\text{CO}}} = 3,76, \quad (11)$$

$$\frac{\text{C}}{\text{H}} = \frac{n_{\text{CO}_2} + n_{\text{CO}}}{n_{\text{H}_2\text{O}}}.$$

Суммарное количество молей n всех индивидуальных веществ в газовой пробе можно определить по известным значениям температуры, удельного объема и давления газа:

$$\begin{aligned} n_{\text{CO}_2} + n_{\text{CO}} + n_{\text{O}_2} + n_{\text{H}_2\text{O}} + n_{\text{N}_2} = \\ = n = pV/RT. \end{aligned} \quad (12)$$

Обычно результаты анализа газа выражаются в мольных долях; зная их, а также общее число молей, можно вычислить количество каждого компонента. Правильность проведения анализа газа можно проверить подстановкой полученных значений в уравнения (11). В случае больших отклонений экспериментальные результаты не должны учитываться, а эксперимент необходимо повторить. С другой стороны, эта система уравнений материального баланса дает возможность оценить наличия компонентов, не определяемых при химическом анализе.

2. ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ С ПОМОЩЬЮ ТЕРМОПАР

2.1. Потери на излучение и теплопроводность

Основные источники ошибок при измерении температуры термопарами — излучение и теплопроводность. Кроме того, каталитические и химические реакции на термопаре также являются источниками ошибок. Для оценки всех этих эффектов запишем уравнение баланса тепла:

$$\begin{aligned} Q + \alpha(T_g - T) + \sigma\varepsilon(T_w^4 - T^4) + \\ + (r/2) d(\lambda dT/dx) dx = 0. \end{aligned} \quad (13)$$

Здесь α — коэффициент теплоотдачи, Q — теплота реакции, σ — постоянная Стефана — Больцмана, ε — степень черноты, λ — теплопроводность, T_g — температура газа. Первый член уравнения выражает теплоту, выделенную при протекании химических реакций (например, при окислении материала термопар или при каталитических реакциях), второй описывает конвективный теплообмен с потоком окружающего газа, третий — потери, вызванные тепловым излучением, а четвертый член соответствует тепловым потерям на теплопроводность в материале термопар. Заметим, что температура спая термопары обычно не равна температуре газа, $T \neq T_g$. При расчете теплообмена излучением с окружающими стенками величиной T_w^4 , как правило, можно пренебречь, потому что $T_w^4 \ll T^4$.

Главный источник ошибки состоит в неточности определения коэффициента теплопередачи α . Выражение для определения α получено в [8]:

$$\text{Nu} = 0,8 \text{Re}^{0,25}, \quad (14)$$

где

$$\text{Nu} = \alpha d_j / \lambda, \quad \text{Re} = \rho w d_j / \eta, \quad (15)$$

d_j — диаметр спая термопары, η — кинематическая вязкость. Нужно учитывать, что для очень точных измерений скорость газа, его состав и свойства газовой смеси должны быть известны именно при той температуре, при которой осуществляются измерения. Это приводит к итерационной процедуре: сначала оценивают температуру газа, после чего свойства газа (λ_g , η и ρ) вычисляют по известным правилам для газовых смесей с использованием оцененного состава газа.

Другой источник ошибок — сильная зависимость излучательной способности ε от температуры. Методы приближенного расчета ε даны в [9]. Следует учитывать, что термопара состоит из двух различных материалов. Поэтому часто используют среднее геометрическое значение двух излучательных способностей:

$$\varepsilon = \sqrt{\varepsilon_1 \varepsilon_2}. \quad (16)$$

Членом, описывающим кондуктивный перенос тепла по термопаре, в уравнении (13) часто пренебрегают, особенно в случае достаточно тонких термопарных проволочек и однородного пламени. Если также пренебречь членом, описывающим химические реакции, то поправку на излучение $\Delta T = T_g - T$ можно вычислить

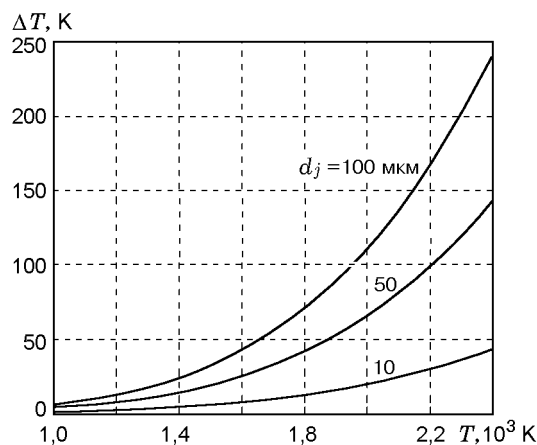


Рис. 8. Изменение поправки на излучение в зависимости от температуры и диаметра спая термопары

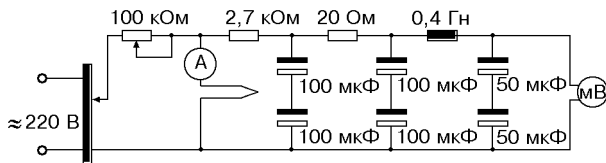


Рис. 9. Электрическая схема для компенсации потерь на излучение

на основе уравнения теплового баланса (13) и соотношений (14)–(16):

$$\Delta T = \frac{1,25 \sigma \varepsilon d_j^{0,75}}{\lambda_g} \left(\frac{\eta}{\rho w} \right)^{0,25} (T^4 - T_w^4). \quad (17)$$

Из формулы (17) видно, что поправка на излучение сильно зависит от температуры, а также от диаметра спая термопары (в степени 0,75), что иллюстрирует рис. 8. При высоких температурах поправка на излучение может достигать сотен градусов, поэтому диаметр спая термопар необходимо делать как можно меньше. При $T < 1000$ К поправкой на излучение можно пренебречь. Для повышения точности оценки результатов диаметр спая должен быть тщательно измерен. Кроме того, интересным результатом является очевидная возможность измерения температуры газа выше точки плавления материала термопары.

2.2. Электрическая компенсация

Метод электрической компенсации позволяет избавиться от всех неопределенностей, возникающих при введении поправки на излучение, и заключается в нагревании термопары электрическим током [9–11]. Несколько упрощенный вариант предложен в работе [10], где для нагрева применялся обычный переменный ток с частотой 50 Гц вместо тока высокой частоты. Типичная экспериментальная установка с применением метода электрической компенсации показана на рис. 9.

Вначале следует провести нагрев термопары в вакууме во избежание конвективной теплопередачи. Этот процесс может быть описан следующим уравнением теплового баланса:

$$aUI = aR_{th}I^2 = \varepsilon\sigma F(T^4 - T_w^4), \quad (18)$$

где U — напряжение, I — ток, a — электрический эквивалент теплоты, R_{th} — среднее сопротивление проводов термопары, F — площадь спая. ЭДС термопары выделяли из переменного напряжения источника нагрева с помощью фильтра низкой частоты. Сигнал сетевого напряжения 220 В частотой 50 Гц почти

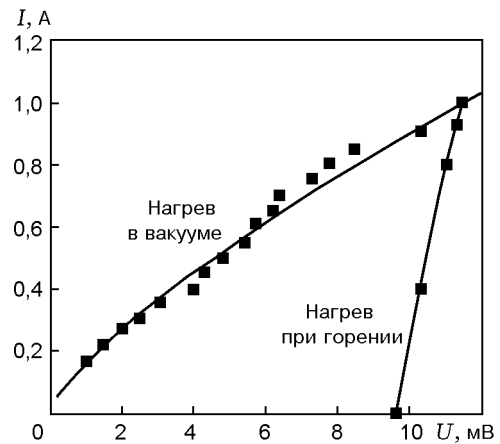


Рис. 10. Электрическая компенсация потерь на излучение

полностью подавлялся батареями электролитических конденсаторов. Ток, нагревающий термопару, устанавливали с помощью стокилоомного потенциометра, и напряжение на термопаре измеряли в зависимости от проходящего тока нагрева. Затем измерение повторяли в камере сгорания и ток нагрева увеличивали до тех пор, пока две кривые нагрева не пересекались. На рис. 10 представлен типичный ход эксперимента для платинородиевой термопары PtRh EL80. Применяя этот метод, термопару можно нагреть до точки плавления. Это можно считать недостатком метода, поскольку не удастся измерять температуру выше температуры плавления термопары, однако метод дает более точные результаты, чем просто вычисление поправки на излучение.

2.3. Другие ошибки измерения

Большинство других ошибок термопарных измерений имеют химическую и механическую природу. Например, многие термопарные сплавы окисляются молекулярным и атомарным кислородом. Типичная реакция, протекающая с вольфрамовыми термопарами, следующая: $W + 1,5O_2 \rightarrow WO_3$. Оксид вольфрама WO_3 очень летуч, и поэтому диаметр спая термопары уменьшается в процессе измерения. Подходящими материалами для термопар, предназначенных для высокотемпературных измерений в окислительных средах, являются иридий, платина, рутений, а также иридийродиевые, платинородиевые и рутенийродиевые сплавы. Другой эффект — каталитический нагрев, приводящий к повышению температуры на поверхности термопары, был подробно исследован в работе [9]. Главная причина каталитического

нагрева — рекомбинация свободных радикалов на поверхности. Разность температур, вызванная этим эффектом, в случае богатых водородом пламен пропорциональна концентрации атомарного водорода. Каталитические эффекты можно уменьшить, покрывая термопару термостойкими оксидами, однако, согласно опыту автора, многие покрытия плохо держатся на металлических проволоках из-за плохой адгезии.

При температурах, близких к точке плавления, время жизни термопары сильно сокращается вследствие увеличения парциального давления паров материала, что приводит к постоянному уменьшению диаметра провода во время измерений. При работе в таких условиях термопара может быть легко разрушена вибрацией в высокоскоростных газовых потоках.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Контактные методы измерения концентрации и температуры в высокотемпературных реагирующих потоках имеют определенные достоинства, связанные с низкой стоимостью и относительной простотой экспериментального оборудования. Однако такие измерения подвержены действию многочисленных источников ошибок и должны проводиться с большой аккуратностью. Во избежание этих ошибок необходимо иметь в виду следующее.

- При планировании экспериментов следует заранее оценить некоторые характеристики (ожидаемые температуры и концентрации компонентов, коэффициент избытка окислителя, скорость потока и т. д.) исследуемой горючей системы, чтобы решить, можно ли успешно применять тот или иной метод измерения.
- Скорость охлаждения — наиболее важный фактор при отборе проб газа. Зонды с диаметром в несколько миллиметров неэффективны.
- Наличие большого количества радикалов ведет к серьезным ошибкам при измерении концентраций.
- Уравнения материального баланса для атомов следует использовать совместно с результатами анализа состава газовой смеси.
- Диаметр используемых термопарных проводов должен быть как можно меньше.
- При измерении температур выше 1000 К необходимо вводить поправки на излучение.

- Теплофизические свойства (теплопроводность, вязкость, плотность, удельное сопротивление, коэффициент излучения и т. д.) многокомпонентных смесей, участвующих в процессе горения, должны быть тщательно определены.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Beal J. L. and Grey J. T.** Sampling and analysis of combustion gases // *J. Amer. Rocket Soc.* May–June 1953. P. 174–177.
2. **Kays W. M.** Numerical solutions for laminar-flow heat transfer in circular tubes // *Trans. ASME.* 1955. V. 77. P. 1265.
3. **Ammann P. R. and Timmins R. S.** Chemical reactions during rapid quenching of oxygen — nitrogen mixtures from very high temperatures // *Amer. Inst. Chem. Eng. J.* 1966. V. 12. P. 956.
4. **Kramlich J. C. and Malte P. C.** Modeling and measurements of sample probe effects on pollutant gases drawn from flame zones // *Combust. Sci. Technol.* 1978. V. 18. P. 91–104.
5. **Malte P. C. and Kramlich J. C.** Further observations of the effect of sample probes on pollutant gases drawn from flame zones // *Combust. Sci. Technol.* 1980. V. 22. P. 263–269.
6. **Nguyen Q. V., Edgar B. L., Dibble R. W., and Gulati A.** Experimental and numerical comparison of extractive and in situ laser measurements of non-equilibrium carbon monoxide in lean-premixed natural gas combustion // *Combust. Flame.* 1995. V. 100. P. 395–406.
7. **Yetter R. A. and Dryer F. L.** Inhibition of moist carbon monoxide oxidation by trace amounts of hydrocarbons // *24th Symp. (Intern.) on Combustion.* Pittsburgh: The Combustion Inst., 1992. P. 757–767.
8. **Kaskan W. E.** The dependence of flame temperature on mass burning velocity // *6th Symp. (Intern.) on Combustion.* New York: Reinhold, 1957. P. 134.
9. **Hayhurst N. and Kittelson D. B.** Heat and mass transfer considerations in the use of electrically heated thermocouples of iridium versus an iridium/rhodium alloy in atmospheric pressure flames // *Combust. Flame.* 1977. V. 28. P. 301–317.
10. **Pein R.** Berechnungsgrundlagen und Messungen zur Stabilisierung turbulenter Flammen durch Flammenhalter // *Diplomarbeit TU Darmstadt,* 1969.
11. **Bonne U., Grewer T. und Wagner H. G.** Messungen in der Reaktionszone von Wasserstoff-Sauerstoff- und Methan-Sauerstoff-Flammen // *Z. physikalische Chemie, Neue Folge.* 1960. Bd 26, N 1/2. S. 93–110.

Поступила в редакцию 20/VI 1999 г.