

двуокиси углерода до величины 10^{-7} с. Учитывая это, значение отрыва электронной температуры можно уменьшить еще по крайней мере на порядок, что практически приводит к отсутствию отрыва температуры.

Таким образом, отрыв электронной температуры в углеводородном пламени за счет соударений второго рода с колебательно-возбужденными молекулами представляется маловероятным. Это подтверждается, в частности, опытными данными, приведенными в [4]. Что же касается наличия повышенной ионизации в углеводородных пламенах, то она может быть объяснена не высокой электронной температурой, а химической ионизацией.

Поступила в редакцию
4/X 1977

ЛИТЕРАТУРА

1. A. Engel, J. R. Cozens. Nature, 1964, 202, 2, 480.
2. M. I. Buchwald, S. H. Bauer. J. Phys. Chem., 1972, 76, 22, 3108.
3. С. А. Лосев. ФГВ. 1976, 12, 2, 163.
4. Ю. С. Ивашенко, Ю. Г. Коробченко, Т. С. Бондаренко. ФГВ, 1975, 11, 6, 825.

ЭКСТРАПОЛЯЦИЯ РАВНОВЕСНОГО СОСТАВА ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ

В. И. Быченко

(Тамбов)

Основной этап определения термодинамических и теплофизических свойств продуктов сгорания — расчет их химического состава. В последнее время разработаны надежные методы расчетов с использованием ЭВМ, которые позволили обобщить результаты расчетов в виде справочных данных [3]. Однако исследование новых композиций и параметров процессов горения приводит к новым термодинамическим расчетам. Для многокомпонентных смесей расчет равновесного состава даже на ЭВМ занимает довольно много времени. Это объясняется тем, что обычно используется метод последовательных приближений, сходимость которого существенно зависит от начального приближения. Кроме того, термодинамический расчет приходится выполнять многократно для определения наиболее оптимальных режимов процессов горения. Потому представляют интерес приемы, которые позволили бы сократить объем необходимых расчетов и улучшить сходимость решения метода последовательных приближений.

Для этой цели с успехом можно применять методы экстраполяции и интерполяции. Они уже нашли применение для термодинамических свойств рабочего тела и энергетических характеристик процессов [1—3]. При этом не исключается необходимость термодинамического расчета, но при условии приемлемой точности его можно проводить для ограниченного набора параметров. Для экстраполяции часто используется разложение функции в ряд Тейлора

$$f = f^0 + \sum (df/dq)^0 \Delta q + 1/2 \cdot \sum (d^2f/dq^2)^0 \Delta q^2 + \dots$$

Соответствующие производные можно найти, если функция непрерывна и дифференцируема. Количество членов, учитываемых в ряде, определяется возможностью нахождения производных высших порядков и требуемой точностью. Равновесные термодинамические функции и характеристики процессов горения — обычно непрерывные функции от их параметров. Для состава продуктов сгорания этот вопрос требует специального исследования, так как при изменении параметров и особенно исходного химического состава топлива в продуктах сгорания могут исчезать некоторые компоненты и появляться другие.

Предлагаемое сообщение посвящено вычислению производных равновесного состава продуктов сгорания по параметрам процесса горения и исходному химическому составу топлива. Проведен также анализ точности экстраполяции состава продуктов сгорания.

В общем случае число молей компонентов продуктов сгорания есть однозначная функция давления в камере сгорания p_k , энтальпии в камере I_k , которая равна энтальпии топлива I_t , и исходного химического состава топлива, для характеристики которого введем некоторый параметр φ ,

$$n_i = f(p_k, I_k, \varphi).$$

Разложение в ряд Тейлора дает

$$n_i = n_i^0 + \left(\frac{\partial n_i}{\partial p_K} \right)_{I_K, \varphi}^0 (p_K - p_K^0) + \left(\frac{\partial n_i}{\partial I_K} \right)_{p_K, \varphi}^0 (I_K - I_K^0) + \left(\frac{\partial n_i}{\partial \varphi} \right)_{p_K, I_K}^0 (\varphi - \varphi^0). \quad (1)$$

В данном случае ограничимся первыми производными, так как возможно исчезновение компонентов продуктов сгорания. Поэтому заранее ориентируемся на малые отклонения, что позволяет ограничиться линейной экстраполяцией. Поскольку учитывается возможность изменения исходного состава, продукты сгорания надо рассматривать как открытую термодинамическую систему, в которой возможно изменение состава вследствие внешних причин (массообмен) [4]. Тогда при равновесном протекании реакций число молей компонентов продуктов сгорания есть функция состояния параметров:

$$n_i = f(p_K, T_K, \varphi).$$

Отсюда полный дифференциал

$$dn_i = \left(\frac{\partial n_i}{\partial T_K} \right)_{p_K, \varphi} dT_K + \left(\frac{\partial n_i}{\partial p_K} \right)_{T_K, \varphi} dp_K + \left(\frac{\partial n_i}{\partial \varphi} \right)_{p_K, T_K} d\varphi. \quad (2)$$

В соотношении (2) первые два слагаемые характеризуют закрытую термодинамическую систему, а последнее — массообмен открытой термодинамической системы. На основании (2) получим необходимые производные

$$\left(\frac{\partial n_i}{\partial p_K} \right)_{I_K, \varphi} = \left(\frac{\partial n_i}{\partial T_K} \right)_{p_K, \varphi} \left(\frac{\partial T_K}{\partial p_K} \right)_{I_K, \varphi} + \left(\frac{\partial n_i}{\partial p_K} \right)_{T_K, \varphi}, \quad (3)$$

$$\left(\frac{\partial n_i}{\partial I_K} \right)_{p_K, \varphi} = \left(\frac{\partial n_i}{\partial T_K} \right)_{p_K, \varphi} \frac{1}{c_p}, \quad (4)$$

$$\left(\frac{\partial n_i}{\partial \varphi} \right)_{I_K, p_K} = \left(\frac{\partial n_i}{\partial T_K} \right)_{p_K, \varphi} \left(\frac{\partial T_K}{\partial \varphi} \right)_{I_K, p_K} + \left(\frac{\partial n_i}{\partial \varphi} \right)_{p_K, T_K}. \quad (5)$$

В выражения (3)—(5) входят производные равновесного состава, которые легко находятся путем дифференцирования системы уравнений, описывающей равновесный состав химически реагирующих систем при постоянных p и T . Вычисление производных температуры рассмотрено в [1, 3]. Они также определяются в ходе термодинамического расчета. Учитывая, что расчет горения сейчас выполняется преимущественно на ЭВМ, вычисление производных состава для экстраполяции не составляет труда. Конкретные расчетные формулы будут зависеть от выбранного метода расчета. Выбор параметра φ для характеристики исходного химического состава топлива зависит от способа задания его элементарного состава.

Для двухкомпонентных топлив исходный химический состав определяется соотношением компонентов x . При постоянном давлении, температуре и при условии равновесного протекания реакций изменение x равносильно изменению материального баланса состава продуктов сгорания, т. е. внесению или удалению в продукты сгорания вполне определенного количества компонентов. Следовательно, имеем открытую термодинамическую систему, изменение состава которой можно охарактеризовать одним параметром x . При этом надо иметь в виду, что изменение исходного химического состава топлива влечет за собой изменение и его энтальпии. Тогда экстраполяционная формула в случае изменения только соотношения компонентов будет иметь вид

$$n_i = n_i^0 + \left(\frac{\partial n_i}{\partial I_K} \right)_{p_K, x}^0 (I_K - I_K^0) + \left(\frac{\partial n_i}{\partial x} \right)_{p_K, I_K}^0 (x - x^0). \quad (6)$$

Для многокомпонентных топлив исходный состав топлива можно задать условной формулой

$$A_{b_1}^{(1)}, A_{b_2}^{(2)}, A_{b_3}^{(3)} \dots A_{b_i}^{(i)} \dots, \quad (7)$$

где $A^{(i)}$ — символ химического элемента; b_i — количество атомов i -го химического элемента. При постоянном давлении и температуре изменение количества атомов в исходном элементарном составе топлива так же будет равнозначно массообмену термодинамической системы с окружающей средой. В данном случае в качестве параметра для характеристики массообмена выберем количество атомов химического элемента в топливе. Учитывая, что при изменении b_i меняется и энтальпия топлива, экстраполяцион-

ная формула запишется следующим образом:

$$n_i = n_i^0 + \left(\frac{\partial n_i}{\partial T_K} \right)_{P_K, b_i} (T_K - T_K^0) + \sum_j \left(\frac{\partial n_i}{\partial b_j} \right)_{P_K, T_K, b_{j \neq i}} (b_j - b_j^0). \quad (8)$$

Точность экстраполяции в общем случае будет зависеть не только от количества членов, учитываемых в разложении (1), но и от формы функциональной зависимости. В экстраполяции равновесного состава выбор формы разложения ограничен, так как энтальпия часто имеет отрицательные значения, а состав продуктов сгорания имеет сложную зависимость от исходного элементарного состава топлива. Поэтому при малых отклонениях параметров рекомендуется использовать разложение вида (1).

Однозначно рекомендовать приемлемую точность для экстраполяции состава без рассмотрения конкретной задачи нельзя. Однако проведенные расчеты позволяют проанализировать возможные погрешности экстраполяции. Так, например, для топлив $H_2 + O_2$ и керосин $+ O_2$ погрешность по преобладающим компонентам зачастую не превышает 0,5% при изменении давления в камере в 3 раза. Точность экстраполяции по энтальпии топлива в большинстве случаев оказывалась достаточно высокой. Наиболее сложно оценить погрешность экстраполяции по исходному химическому составу топлива. Для иллюстрации можно привести некоторые оценочные значения. Например, в области соотношений компонентов, обеспечивающих максимум энергетических характеристик при изменении коэффициента избытка окислителя $\alpha = \kappa/\kappa_0$ в пределах $+0,05$ и в диапазоне давлений $1 \div 100$ бар, погрешности по преобладающим компонентам для некоторых топлив были следующими: топливо $H_2 + O_2 - \delta_{H_2O} = 0,1 \div 0,3\%$; $\delta_{H_2} = 0,1\%$; топливо керосин $+ O_2 - \delta_{H_2O} = 1,3 \div 1,5\%$; $\delta_{CO} = 0,2 \div 1,6\%$; $\delta_{CO_2} = 0,8 \div 2,3\%$.

Таким образом, получены общие термодинамические соотношения, позволяющие вычислить частные производные равновесного состава продуктов сгорания по параметрам, определяющим процесс горения, и по исходному химическому составу топлива. Экстраполяция состава с помощью этих производных позволяет оценивать влияние изменения этих факторов на равновесный состав продуктов сгорания. Особо отмечается возможность оценки влияния различных добавок в топливо на равновесный состав продуктов сгорания. При этом, конечно, предполагается, что добавки состоят из тех же элементов, что и топливо. Использование экстраполяционных значений состава в качестве начального приближения для новых параметров процесса горения позволяет улучшить сходимость термодинамического расчета.

Автор выражает благодарность В. Е. Алемасову и А. Ф. Дрегалину за внимание к работе и полезные советы.

Поступила в редакцию
5/IX 1977

ЛИТЕРАТУРА

1. В. Е. Алемасов, А. Ф. Дрегалли, В. И. Быченко. Тр. КАИ, вып. 88, 1965.
2. В. И. Быченко, Р. А. Мухамедзянов. Тр. КАИ, вып. 153, 1973.
3. Термодинамические и теплофизические свойства продуктов сгорания. Справочник. Под ред. акад. В. П. Глушко. Т. 1. М., ВИНТИ, 1971.
4. Р. Хаазе. Термодинамика необратимых процессов. М., «Мир», 1967.

К ВОПРОСУ ОБ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОМ ИССЛЕДОВАНИИ САМОВОСПЛАМЕНЕНИЯ ТОПЛИВА В ОДНОРОДНОМ ПОТОКЕ

В. Н. Груздев, Н. А. Малишевская, А. В. Талантов

(Казань)

При экспериментальном исследовании самовоспламенения топлива в потоке горячих газов большое влияние на точность и достоверность получаемых результатов оказывают чисто методические вопросы. Процесс самовоспламенения очень чувствителен к колебаниям параметров потока, которые в условиях реальных установок неизбежны. Определение момента самовоспламенения затруднено неопределенностью характерных признаков воспламенения, поскольку процесс развивается в несколько стадий, начиная от слабого голубого свечения до устойчивого фронта пламени [1].