

ная формула запишется следующим образом:

$$n_i = n_i^0 + \left(\frac{\partial n_i}{\partial T_K} \right)^0 (T_K - T_K^0) + \sum_j \left(\frac{\partial n_i}{\partial p_K} \right)^0 (p_K - p_K^0) + \sum_{j \neq i} \left(\frac{\partial n_i}{\partial b_j} \right)^0 (b_j - b_j^0). \quad (8)$$

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. Дрегалю за внимание к работе и полезные советы.

Поступила в редакцию
5/IX 1977

ЛИТЕРАТУРА

1. В. Е. Алемасов, А. Ф. Дрегалю, 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].

В работе предлагается способ фиксирования момента воспламенения с помощью стабилизатора пламени в виде плохобтекаемого тела, помещенного в поток. Это позволяет однозначно определить момент воспламенения, так как его четко характеризует появление очага горения за стабилизатором.

В экспериментах горячий газ (генератор газа — жаровая труба камеры сгорания серийного двигателя) по технически гладкой трубе сечением $0,1 \times 0,1$ м, длиной 3 м подавался в отсек, состоящий из двух центробежных форсунок, расположенных против потока, и препятствия в виде стабилизатора пламени (тело желобкового профиля длиной 0,1 м с углом при вершине 60° и характерным размером по фронту $d = 0,005; 0,015; 0,030$ м). Профиль скорости во входе в отсек соответствовал развитому турбулентному пограничному слою, а профиль температур был достаточно ровным, так как применялась довольно эффективная теплоизоляция. Расстояние между форсунками и стабилизатором задавалось переменным ($L_B = 0,14; 0,5; 1,0$ м). В качестве топлива использовался авиационный керосин марки ТС-1, подаваемый в поток в количестве, соответствующем коэффициенту избытка воздуха по оставшемуся после генераторной камеры кислороду ($\alpha = 3,0$).

Методика опыта заключалась в плавном повышении температуры газа перед форсунками вплоть до значения, при котором происходила вспышка пламени за стабилизатором. Эта температура потока принималась за температуру самовоспламенения T_B . Значения T_B , определенные для трех размеров стабилизаторов, графически экстраполировались до нулевого размера. Полученные таким образом величины T_{B0} соответствовали температуре самовоспламенения керосина в условиях прямого потока.

Эксперименты показали, что T_B керосина в потоке, имеющем препятствия, за которыми образуются зоны обратных токов,

$$T_B = T_{B0} - \Delta T_d.$$

Величина ΔT_d увеличивается с ростом характерного размера препятствия. Обработка экспериментальных данных, полученных в диапазоне скорости потока $w = 100-250$ м/с при $L_B = 1000$ мм, дает следующее выражение с точностью $\pm 5\%$:

$$\Delta T_d = 10 \cdot d^{0,55}, \quad (1)$$

где d — характерный размер препятствия (стабилизатора), мм. Как видно из рисунка и формулы (1), влияние препятствия довольно существенное. Так, введение в поток стабилизатора размером 30 мм снижает температуру самовоспламенения приблизительно на 70 К. Снижение температуры воспламенения при наличии стабилизатора пламени связано, по-видимому, с увеличением общего времени пребывания смеси за счет времени пребывания в зоне обратных токов за телом.

В присутствии стабилизатора пламени общее время задержки воспламенения τ_a складывается из времени пребывания топлива в пространстве между форсункой и стабилизатором τ и частью среднего времени пребывания газов в зоне рециркуляции за стабилизатором τ_p , используемого топливом для подготовки к воспламенению

$$\tau_a = \tau + \tau_p. \quad (2)$$

Здесь

$$\tau = L_B / w, \quad (3)$$

где L_B — расстояние между форсункой и стабилизатором, м; w — средняя скорость в том же промежутке, м/с;

$$\tau_p = K \tau_{np} \quad (4)$$

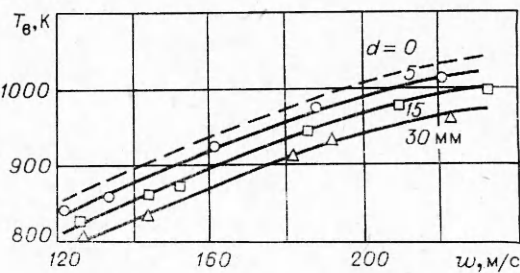
(K — коэффициент, учитывающий долю времени пребывания в зоне обратных токов). Среднее время пребывания в зоне обратных токов за стабилизатором подсчитывается, согласно [3], по формуле

$$\tau_{np} = 30d/w. \quad (5)$$

С учетом (3)–(5) формула (2) принимает вид

$$\tau_a = (L_B + 30Kd)/w. \quad (6)$$

Используя графики типа, приведенных на рисунке, можно при фиксированных значениях температуры самовоспламенения определить значения скорости потока w ,



соответствующие различным размерам стабилизатора пламени d . Полагая, что при данных условиях время задержки воспламенения определяется только температурой, его можно определить для заданного значения L_B по величине скорости, соответствующей на рисунке нулевому размеру стабилизатора. Тогда

$$K = \frac{\tau_a \cdot \omega - L_B}{30d}. \quad (7)$$

Обработка экспериментальных данных позволила по формуле (7) определить значения K для различных размеров стабилизатора, расстояний L_B и скоростей потока. Выяснилось, что K не зависит ни от размера стабилизатора, ни от скорости потока. Однако значение K довольно сильно увеличивается с ростом расстояния L_B в соответствии с аппроксимирующим выражением (точность аппроксимации $\pm 5\%$)

$$K = 0,047 L_B^{1,2}.$$

С увеличением L_B от 0,14 до 1,0 м доля времени пребывания в зоне обратных токов за препятствием, используемая топливом для самовоспламенения, увеличивается примерно от 5 до 50% и не зависит от размера препятствия и скорости потока. Предположительно полученный характер зависимости $K=f(L_B)$ можно объяснить ростом степени испарения и равномерности распределения топлива по сечению потока перед стабилизатором. По-видимому, в случае равномерной подачи газообразного топлива все время пребывания в зоне обратных токов за препятствием будет использоваться топливом для самовоспламенения, и влияние постановки препятствия в поток на время задержки воспламенения будет гораздо сильнее.

Поступила в редакцию
28/II 1978

ЛИТЕРАТУРА

1. Ю. М. Трушин.— В сб.: Третье Всесоюзное совещание по теории горения. Т. 1. М., Изд-во АН СССР, 1960.
2. Н. А. Панова, В. Н. Груздев, А. В. Талантов.— В сб.: Горение в потоке. Вып. 1. Казань, 1976.
3. Г. А. Бовина.— В сб.: Горение при пониженных давлениях и некоторые вопросы стабилизации пламени в однородных и двухфазных системах. М., Изд-во АН СССР, 1960.
4. В. Н. Груздев, Н. А. Малишевская, А. В. Талантов. Изв. вузов. Авиационная техника, 1978, 3.

К ВОПРОСУ ОБ АНОМАЛЬНОЙ ЗАВИСИМОСТИ СКОРОСТИ ГОРЕНИЯ НЕКОТОРЫХ ТЕРМИТНЫХ СМЕСЕЙ ОТ ДАВЛЕНИЯ

Г. В. Иванов, В. Г. Сурков, А. М. Викторенко,
А. А. Решетов, В. Г. Иванов

(Томск)

Аномальная зависимость скорости горения от давления наблюдается довольно часто при горении гетерогенных конденсированных систем [1—3]. Общие теории горения этому явлению объяснения не дают, мало попыток объяснения аномальной зависимости и для частных случаев [2, 4]. Очевидно, что существование такого нетипичного явления связано с протеканием процессов, которые в общей теории горения не учитываются. Выявление факторов, приводящих к снижению скорости горения с ростом давления, и есть цель настоящей работы.

Для исследования выбраны некоторые термитные смеси, содержащие компоненты с различными свойствами. Компоненты подбирались на основе того, что они присутствовали в смесях, имеющих, по литературным данным, аномальную зависимость скорости горения u от давления p [1, 2]. В качестве горючих Mg, Zn и Zr выбраны по следующим причинам. Легкокипящий Mg, согласно [1], в смеси с Cr_2O_3 горит с аномальной зависимостью $u(p)$, цинк тоже типичный представитель легкокипящих металлов; цирконий же тугоплавков, не испаряется и горит с поверхности [4]. В качестве окислителей взяты окислы металлов: PbO_2 , BaO_2 , MnO_2 , V_2O_5 , Cr_2O_3 , Fe_2O_3 и MoO_3 .