

составов, содержащих более 5 % пара. Найдена величина нижнего концентрационного предела гремучего газа в смеси с водяным паром и азотом при повышенных давлениях и температурах.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Coward H. F., Janes G. M. Bulletin 503. Bureau of Mines.— Washington, 1952.
2. Zabatakis M. G. Bulletin 627. Bureau of Mines.— Washington, 1965.
3. Dvell J. L., Belles F. E. NASA Report 1383. Survey of hydrogen combustion properties, 1958.
4. Макеев В. И., Гостинцев Ю. А., Строгонов В. В. и др. ФГВ, 1983, 19, 5, 16.
5. Kumar R. K., Tamm H., Harrison W. C. Comb. Sci. Technol., 1983, 35, 1/4, 175.
6. Kogarko S. M., Lyamin A. G., Popov O. E. Hydrogen Behaviour and Control and Related Containment Loading Aspects.— Vienna: Atomic Energy Agency, 1984.
7. Когарко С. М., Рябиков О. Б. ФГВ, 1970, 6, 3, 406.
8. Янтовский С. А., Черняк М. В. ЖФХ, 1966, 40, 11, 2899.
9. Бабкин В. С., Вьюн А. В. ФГВ, 1981, 17, 5, 8.
10. Dixon-Lewis G. Arch. Comb., 1984, 4, 4, 279.
11. Lui D. D. S., McFarlaner. Comb. Flame, 1983, 49, 1—3, 59.
12. Eegena T., Takeo T. Comb. Flame, 1986, 65, 1, 35.
13. Мольков В. В., Бухаров В. Н., Бабкин В. С. и др. // Пожарная профилактика.— М.: ВНИИПО, 1986.
14. ГОСТ 12.1.044-84. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов. Номенклатура показателей и методы их определения.
15. Бабкин В. С., Сеначин П. К., Крахтинова Т. В. ФГВ, 1982, 18, 6, 14.
16. Кудрявцев Е. А., Кривулин В. Н., Баратов А. И. и др. // Пожаровзрывоопасность веществ и материалов.— М.: ВНИИПО, 1982.
17. Вукалович М. И. Теплофизические свойства воды и водяного пара.— М.: Машиностроение, 1967.
18. Когарко С. М., Кушарин Ю. А., Лямин А. Г. и др. // Взрывобезопасность технологических процессов, пожаро- и взрывозащита оборудования и зданий.— Черкассы: ВНИИТБХП, 1985.

Поступила в редакцию 1/VII 1987,  
после доработки — 12/IV 1988

УДК 534.46

### О МЕТОДАХ РАСЧЕТА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ЗАВИСИМОСТИ СКОРОСТИ ГОРЕНИЯ ОТ ДАВЛЕНИЯ

*Л. Б. Петухова, Т. В. Перегудова, В. А. Струнин, Г. Б. Манелис*  
(Черноголовка)

Степень зависимости скорости горения от давления определяется коэффициентом

$$\nu = \frac{\partial \ln u}{\partial \ln p} = \frac{p \partial u}{u \partial p} \approx \frac{p \Delta u}{u \Delta p} \quad (1)$$

В относительно узком интервале давлений  $\nu$  считают постоянным и в этом случае зависимость  $u(p)$  выражают степенным законом

$$u = b p^\nu,$$

где  $u$  — скорость горения;  $p$  — давление;  $b$  — константа. Вычисление  $\nu$  проводят обычно спрямлением экспериментальных данных в логарифмических координатах с использованием метода наименьших квадратов. Однако в широком диапазоне давлений  $\nu$  — переменная величина, тогда приходится делить этот диапазон на две или более области, в каждой из которых  $\nu = \text{const}$ . Естественно, что такой способ расчета  $\nu$  не лишен субъективного произвола и определенной доли некорректности.

В математической теории горения, разработанной для случаев простых химических реакций, коэффициент  $\nu$  связан элементарным образом с порядком реакции  $n$  [1]:  $\nu = n/2$  ( $\nu = 0,5$  для реакции первого порядка,  $\nu = 1$  для реакции второго порядка). На практике же такие идеализиро-

ванные случаи встречаются очень редко, и, как правило, величина  $\nu$  является переменной и зависящей как от условий сжигания (давление, начальная температура), так и от исходных кинетических, термодинамических и иных параметров. Даже в случае газофазной мономолекулярной реакции  $\nu$  может меняться от 1 до 0,5 в силу совместного влияния процессов активации, дезактивации и собственно распада молекул [2].

Для сложных кинетических процессов (например, параллельные и конкурирующие реакции) возможны режимы, когда коэффициент  $\nu$  определяется совокупным действием различных реакций, скорость которых по-разному зависит от давления [3]. В модели, где скорость горения лимитируется разложением вещества в конденсированной фазе, величина  $\nu$  — функция параметров химической реакции и сублимации [4]. Наконец, для смесевых систем процессы тепло- и массообмена между компонентами также могут существенным образом влиять на степень зависимости скорости горения от давления [5, 6].

Следовательно, корректный расчет  $\nu$  может дать дополнительные сведения о механизме горения и обоснования для выбора и подтверждения той или иной модели горения.

В последнее время при обработке экспериментальных данных применяются метод построения сглаживающего сплайна с использованием программ обработки на ЭВМ. Сущность метода сплайна [7] заключается в нахождении на конечном отрезке  $[a, b]$  функции  $S(x) \in W_2^2$ , для которой достигается

$$\min_{f \in W_2^2} \int_a^b [f''(t)]^2 dt \quad (2)$$

при условии

$$\sum_{i=1}^N \frac{[y_i - f(x_i)]^2}{\sigma_i^2} = N, \quad (3)$$

где  $y_i$  — измеренные в точках  $x_i$  значения функций;  $\sigma_i^2$  — дисперсии в точках  $x_i$ ;  $N$  — число точек;  $W_2^2$  — класс функций  $f(x)$  с абсолютно непрерывной первой производной и второй производной из  $L^2[a, b]$ ;  $L^2[a, b]$  — класс действительных интегрируемых с квадратом функций на  $[a, b]$ .

Решением экстремальной задачи (2), (3) является кубический сплайн, удовлетворяющий краевым условиям  $S''(a) = S''(b) = 0$ . Кубический сплайн обеспечивает заданную близость от измеренных значений и отсутствие резких изменений функции между измеренными значениями. Метод решения (2), (3) и программа, реализующая его, описаны в [8]. Там же приведены примеры применения сглаживающих кубических сплайнов в химической физике.

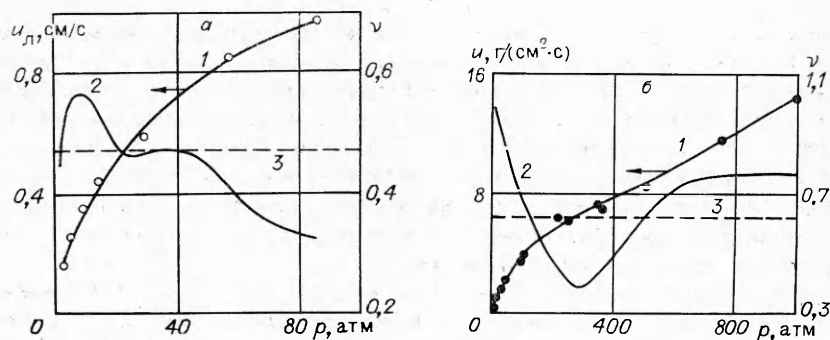
Для обработки данных по скоростям горения на ЭВМ разработана программа, существенно дополняющая предыдущую:

1) в ней реализуется решение задачи приближенного восстановления функции на основе аналитического представления сглаживающего кубического сплайна

$$S(x) = S(x_i) + S'(x_i)(x - x_i) + \frac{S''(x_i)}{2}(x - x_i)^2 + \frac{S'''(x_i)}{6}(x - x_i)^3,$$

где  $x_i \leq x \leq x_{i+1}$ ;  $i = 1, \dots, N-1$ ;  $S'(x_i)$ ,  $S''(x_i)$ ,  $S'''(x_i)$  — первая, вторая и третья производные сплайна соответственно;

2) алгоритм решения задачи сглаживания дополнен предварительным исследованием возможности приближения экспериментальных данных, в пределах заданной погрешности, к прямой, построение которой в этом случае осуществляется по методу наименьших квадратов;



Зависимость скорости горения от давления.

а) данные [9]; б) данные [10]. 1 — расчет точки — эксперимент; 2, 3 — зависимость  $v(p)$ , полученная сглаживанием данных в обычных и логарифмических координатах соответственно.

### 3) точность выполнения условия (3)

$$N - \varepsilon \leq \sum_{i=1}^N \frac{[y_i - S(x_i)]^2}{\sigma_i^2} \leq N + \varepsilon$$

может варьироваться. В связи с этим модифицирован поиск параметра регуляризации.

В качестве иллюстрации метода на рисунке показаны примеры обработки экспериментальных данных, взятых из литературных источников. Ошибка опыта полагалась равной 5%. Кривые 1 представляют собой сплайн, сглаживающий экспериментальные точки со средним отклонением 3,5% в первом примере и 3% во втором, кривые 2 — рассчитанная зависимость  $v$  от  $p$ . Значения  $v$  рассчитывались по формуле (1) в узком интервале давлений.

На рисунке а для смешанного топлива на основе перхлората аммония и полиэфирного каучука [9] при  $p \approx 10$  атм наблюдается максимум ( $v \approx 0,7$ ), в области  $p = 20 \div 50$  атм  $v \approx 0,55$ , в дальнейшем происходит уменьшение  $v$ . Следует отметить, что из-за малого числа точек в этом примере полученная зависимость  $v(p)$  не является в полной мере достоверной и требует дополнительных обоснований. На рисунке б (модельный состав из перхлората аммония, кокса и бихромата калия [10]) максимум  $v$  также реализуется при низких давлениях, минимальное значение  $v = 0,4$  достигается при  $\sim 300$  атм, а при  $p = 600 \div 1000$  атм  $v$  становится постоянным. Отметим, что сглаживание данных в логарифмических координатах дает постоянное значение  $v$  в обоих случаях (0,47 в первом примере и 0,62 во втором), что эквивалентно по результатам традиционному методу спрямления точек.

Таким образом, метод сглаживания экспериментальных данных в обычных координатах выявляет более тонкие детали зависимости  $u(p)$  по сравнению с обычными методами. Это может дать полезную информацию как о механизме горения в совокупности с другими характеристиками, так и о тенденции изменения  $v$  в широком интервале давлений, что может иметь практическое значение при оценке баллистических свойств конденсированных систем.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Зельдович Я. В., Франк-Каменецкий Д. А. ЖФХ, 1938, 12, 1, 100.
2. Манелис Г. Б., Струнин В. А., Лебедева Е. В. Хим. физика, 1986, 5, 9, 1269.
3. Струнин В. А., Манелис Г. Б. ФГВ, 1983, 19, 2, 89.
4. Струнин В. А., Манелис Г. Б. ФГВ, 1979, 15, 5, 24.
5. Beckstead M. W. et al. AJAA J., 1970, 8, 12, 2200.
6. Струнин В. А., Дьяков А. П., Манелис Г. Б. ФГВ, 1981, 17, 1, 19.
7. Стечкин С. Б., Субботин Ю. Н. Сплайны в вычислительной математике.— М.: Наука, 1976.

8. Перегудова Т. В., Разников В. В. Построение сглаживающего сплайна для экспериментальной кривой на ЭВМ СМ-3 // АН СССР, ОИХФ.— Препр.— Черноголовка. 1985.  
 9. Blair D. W. AJAA J., 1970, 8, 8, 1439.  
 10. Глазкова А. П. Катализ горения взрывчатых веществ.— М.: Наука, 1976.

Поступила в редакцию 28/IX 1987,  
 после доработки — 24/VI 1988

УДК 532.52 : 662.61

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВУХФАЗНОГО ТЕЧЕНИЯ СМЕСИ ГАЗА С ГОРЯЩИМИ ЧАСТИЦАМИ МЕТАЛЛА В ПОЛУЗАМКНУТОМ КАНАЛЕ

В. Н. Виллюнов, А. Б. Ворожцов, Ю. В. Феценко  
 (Томск)

Рассмотрим полузамкнутый канал конденсированного вещества (к-вещества), горящего по боковой поверхности  $S_i$  с массовой скоростью  $\dot{m}_i$  и тепловым эффектом  $Q_i$  (рис. 1). Продукты сгорания содержат дисперсную фазу в виде непрореагировавшего металла. Истекают продукты сгорания через правую границу при  $x/L = 1$ . Известно, что полнота сгорания к-веществ, содержащих частицы металла, в большой степени определяется временем химического реагирования последних и функционально связана с временем пребывания продуктов сгорания в канале  $\tau_{пр}$ . Если за время пребывания частицы металла не успевают догорать, то изменяются параметры состояния двухфазной среды в канале и характеристики истечения.

Для полного сгорания частиц металла необходимо, чтобы  $\tau_{пр} \geq \tau_*$ , где  $\tau_*$  — время полного сгорания частиц. Макрокинетика процесса основывается на привлечении эмпирического закона скорости горения индивидуальной частицы [1] и осложняется агломерацией частиц на поверхности конденсированного вещества [1—3], переменностью концентрации окисляющих реагентов в активной среде, скоростным и тепловым запаздыванием частиц, их динамическим взаимодействием [4] и т. д. Учет всех перечисленных выше факторов при определении  $\tau_{пр}$  сложен, и часто, особенно при качественных оценках, оно определяется весьма приблизительно или равным времени релаксации свободного объема канала, или рассчитывается при существенных допущениях [5], что снижает достоверность получаемой в расчетах величины полноты сгорания к-вещества. Внутренние двухфазные течения в условиях скоростной и температурной неравновесности хорошо изучены [6, 7]. Детальных исследований движения реагирующей газовой смеси значительно меньше (см., например, [8]).

В настоящей работе рассмотрены модель и результаты расчетов двухфазного полидисперсного течения газа с горящими частицами металла в полузамкнутом канале при скоростной и температурной неравновесности частиц и предложен метод для прогнозирования полноты сгорания к-вещества. Приняты следующие допущения:

- 1) частицы, поступающие с поверхности к-вещества, образуют полидисперсную систему  $N$  фракций. Функция распределения массы дисперсной фазы по размерам частиц предполагается заданной;
- 2) частицы представляют собой конгломерат металл/окисел в виде «ореха», где «скорлупа» — жидкий окисел, а «ядро» — жидкий металл.

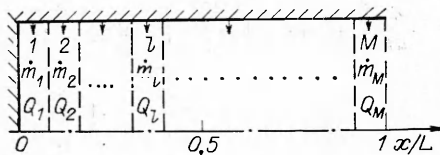


Рис. 1. Область решения.