

Таблица 3

Номер смеси	u, мм/сек				z				Примечание
	5 атм	10 атм	40 атм	100 атм	5 атм	10 атм	40 атм	100 атм	
3	4,4	6,5	13,0	18,7	1,10	1,18	1,26	1,38	$z = u_3/u_1$
3'	4,2	6,4	13,4	20,5	1,05	1,16	1,30	1,52	$z = u_3''/u_1$
4	6,1	8,4	12,4	16,8	3,21	3,00	2,34	1,79	$z = u_1/u_2$

не влияет на основной вывод работы о том, что добавка алюминия действует на разбавленную смесь гораздо сильнее, чем на исходную.

2. Увеличение z по мере уменьшения температуры (T_r) горения пороха, конечно, будет наблюдаться только до той температуры, при которой частицы алюминия еще достаточно быстро воспламеняются вблизи поверхности пороха. При дальнейшем уменьшении T_r алюминий перестанет воспламеняться в зоне влияния и превратится в инертную добавку.

Поступила в редакцию
14/III 1968

ЛИТЕРАТУРА

1. Н. Н. Бахман, А. Ф. Беляев, Ю. А. Кондрашков. ФГВ, 1970, 6, 1.
2. А. Е. Ван. Строение и свойства двойных металлических систем, т. I. Физматгиз, 1959.
3. П. Б. Контор, В. В. Кандиба, Е. М. Фомичев. Укр. физ. ж., 1962, 2, 205.
4. Н. Н. Бахман. Докл. АН СССР, 1962, 145, 6, 1328.
5. Н. Н. Бахман, Ю. А. Кондрашков. Докл. АН СССР, 1966, 168, 4, 844.

УДК 662.217.7

ДИФфуЗИОННОЕ ГОРЕНИЕ КАПЛИ ЖИДКОГО ГОРЮЧЕГО В СМЕСИ ДВУХ ОКИСЛИТЕЛЕЙ

М. А. Гуревич, А. М. Степанов
(Ленинград)

Диффузионная теория горения капли жидкого горючего, предложенная Г. А. Варшавским [1] в упрощенном варианте (т. е. в допущении сферической симметрии и независимости коэффициентов переноса от температуры и локального состава смеси), приводит, как известно, к следующему соотношению для вычисления скорости испарения горящей капли g :

$$\frac{g}{4\pi\rho D} \left(\frac{1}{r_0} - \frac{1}{r_3} \right) = \ln |B|, \quad (1)$$

где

$$B = 1 - \frac{c_p}{l} (T_0 - T_3) + \frac{q_{пкз}}{l}. \quad (2)$$

Это соотношение получено для случая, когда окружающий каплю газ содержит только один окислитель (например, кислород). В действительности газовая среда может содержать несколько таких окислителей. Легче всего распространить расчет на случай, когда каждый из окислителей не реагирует ни с какими продуктами (конечными или промежуточными) реакций горючего с другими окислителями. В этом случае верна формула (1), а (2) должна быть заменена формулой

$$B = 1 - \frac{c_p}{l} (T_0 - T_3) + \frac{1}{l} \sum_{(i)} q_i n_i. \quad (3)$$

Менее очевиден результат, когда продукты реакции горючего с одним из окислителей, могут, в свою очередь, реагировать с другим окислителем. Ниже рассмотрен случай двух окислителей: кислорода и водяного пара. Разумеется, такой выбор не обязателен и сделан лишь для определенности.

На первый взгляд кажется, что водяной пар вообще не принимает участия в реакции, пока не израсходован весь кислород. Действительно, в силу диффузионности процесса, водород, получившийся при реакции окисления горючего водяным паром, в свою очередь окисляется кислородом. Таким образом, расход водяного пара равен

нулю. Последнее верно, но все не означает, что водяной пар можно считать инертным газом и рассчитывать скорость испарения капли по формулам (1) и (2).

Сферическая капля горючего радиусом r_0 (см. рисунок) имеет температуру T_0 и окружена «приведенной пленкой» радиуса r_3 . Температура среды T_3 и весовые доли кислорода $n_{кз}$ и водяного пара $n_{вз}$ в ней заданы. Предполагается число Льюиса $Le=1$, произведение коэффициента диффузии на плотность смеси одинаково для всех компонент и не зависит от координаты $D\rho = \text{const}$, удельная теплоемкость смеси не зависит от координаты $-c_p = \text{const}$ ¹⁾. Предполагается полная диффузионность процесса — реагирование возможно только на границах зон (r_1 и r_2), концентрации соответствующих компонент на этих границах исчезающе малы,

нигде не могут присутствовать одновременно две реагирующие между собой компоненты. Процесс стационарен — все тепло, подводимое к капле, расходуется на испарение; вещество и энтальпия нигде не накапливаются.

Полный поток массы через произвольную сферу радиуса r равен потоку горючего g — скорости испарения капли. Массовый поток любой компоненты g_{ji} в любой из зон равен

$$g_{ji} = -4\pi\rho D r^2 \frac{dn_j}{dr} + gn_j. \quad (4)$$

Здесь $i=1, 2, 3$ — номер зоны; $j=k, в, T$ — индекс компоненты. В число компонент включена и «температура» — $n_T = T$, $g_{Ti} = \frac{Q_i}{c_p}$. Например, $g_{кз}$ — поток кислорода в третьей зоне, g_{T2} — частное от деления теплового потока во второй зоне на теплоемкость.

Интегрирование (4) в пределах любой зоны дает

$$\frac{g}{4\pi\rho D} \left(\frac{1}{r_{i-1}} - \frac{1}{r_i} \right) = \ln |B_i|. \quad (5)$$

Здесь

$$B_i = \frac{g_{ji} - gn_{ji}}{g_{ji} - gn_{j, i-1}} \quad (6)$$

в силу одинаковости левых частей равенства (5) одинаково для всех компонент, т. е. зависит только от номера зоны i , но не от индекса компоненты j .

Цель дальнейших вычислений заключается в приведении формул (5) и (6) к виду, аналогичному (1) и (2), т. е. в исключении из них радиусов границ раздела

¹⁾ Следствие этих предположений — независимость от координаты коэффициента теплопроводности газовой смеси $\lambda = \text{const}$.

зон r_1 , r_2 и соответствующих им значений температуры и концентраций. Радиусы границ исключаются простым сложением:

$$\frac{g}{4\pi\rho D} \left(\frac{1}{r_0} - \frac{1}{r_3} \right) = \ln(B_1 B_2 B_3). \quad (7)$$

Выражения всех B_i получаются после подстановки граничных значений концентраций и температуры и учета стехиометрических соотношений

$$B_1 = \frac{t_1 - T_1}{t_1 - T_0} \quad (8)$$

(температура, первая зона);

$$B_2 = \frac{t_2 - T_2}{t_2 - T_1} = 1 + \frac{n_{в2}}{\beta_1} \quad (9)$$

(температура и водяной пар, вторая зона);

$$B_3 = \frac{t_3 - T_3}{t_3 - T_2} = 1 + \frac{n_{к3}}{\beta_2} = \frac{n_{в3}}{n_{в2}} \quad (10)$$

(температура, кислород и водяной пар, третья зона).

Здесь введены обозначения: $t_i = \frac{gT_i}{g}$; β_1, β_2 — массовые стехиометрические коэффициенты «вода/горючее» и «кислород/горючее» соответственно.

Из формул (9) и (10), исключив $n_{в2}$, легко найти

$$B_2 B_3 = 1 + \frac{n_{в3}}{\beta_1} + \frac{n_{к3}}{\beta_2}. \quad (11)$$

Выразив из формул (9) и (10) температуру на внешней границе первой зоны T_1 и подставив ее в равенство (8), получаем

$$B = B_1 B_2 B_3 = \frac{t_3 - T_2 - (t_3 - t_2) B_3 - (t_2 - t_1) B_2 B_3}{t_1 - T_0}. \quad (12)$$

Разности $t_2 - t_1 = \frac{q_1}{c_p}$ и $t_3 - t_2 = \frac{q_2}{c_p}$ суть теплоты реакций, происходящих на границах раздела зон, рассчитанные на единицу массы горючего (материала капли) и деленные на теплоемкость c_p .

Если в формуле (12) учесть $t_1 = T_0 - \frac{l}{c_p}$ и $t_2 = T_0 - \frac{l}{c_p} + \frac{q_1 + q_2}{c_p}$ (l — удельная теплота испарения горючего), а также равенство (11) и второе из равенств (10), для искомого произведения получается:

$$B = B_1 B_2 B_3 = 1 + \frac{1}{l} \left[c_p (T_3 - T_0) + q_1 \frac{n_{в3}}{\beta_1} + (q_1 + q_2) \frac{n_{к3}}{\beta_2} \right].$$

Последнее равносильно равенству

$$B = 1 + \frac{1}{l} [c_p (T_3 - T_0) + q_k n_{к3} + q_v n_{в3}], \quad (13)$$

где q_k и q_v — теплоты реакций горючего с каждым из окислителей, рассчитанные на единицу массы окислителя. Значение B по (13) может быть использовано в формуле (7) или, что то же самое, в (1) для вычисления скорости испарения капли. Для рассмотренного здесь случая (13) полностью совпадает с (3). Таким образом, в рассмотренной здесь задаче водяной пар действительно не расходуется ($g_{в3} = 0$), но ускоряет испарение капли совершенно так же, как если бы он был «независимым» окислителем.

Поступила в редакцию
20/XII 1967

ЛИТЕРАТУРА

1. Г. А. Варшавский. Тр. НИИ-1, 1945, 6.