

ЛИТЕРАТУРА

1. Кашпоров Л.Я., Шелудяк Ю.Е., Мальцев В.М. и др. Влияние начального теплового состояния на скорость горения конденсированных систем // Химическая физика процессов горения и взрыва. Горение конденсированных систем. Материалы IX Всесоюзного симпозиума по горению и взрыву. — Черногловка. — 1989. — С. 18—21.
2. Кашпоров Л.Я., Рабинович В.А., Шелудяк Ю.Е. Теплофизические аспекты процесса горения // Теплофизические свойства веществ и материалов. М.: Издательство стандартов. — 1991. — Вып. 30. — С. 139—147.
3. Силин Н.А., Кашпоров Л.Я., Шелудяк Ю.Е. и др. Функциональная зависимость скорости горения смесей $Mg + NaNO_3$ от многих переменных // ФГВ. — 1992. — Т. 28. — № 5. — С. 27—34.
4. Кашпоров Л.Я., Канахин С.П., Шелудяк Ю.Е., Ухов В.В. О механизме горения нитрогликоля // ФГВ. — 1993. — Т. 29. — № 2. — С. 32—36.
5. Кашпоров Л.Я., Рабинович В.А., Шелудяк Ю.Е. Энтальпийный подход к изучению процесса горения. I. Уравнение закона сохранения энергии для химически реагирующих систем и его следствия для процесса горения // ИФЖ. — 1994. — Т. 66. — № 3.
6. Кашпоров Л.Я., Рабинович В.А., Шелудяк Ю.Е. Энтальпийный подход к изучению процесса горения. II. Результаты теплового анализа некоторых горючих систем // ИФЖ. — 1994. — Т. 66. — № 3. — С.
7. Шелудяк Ю.Е., Кашпоров Л.Я., Малинин Л.А., Цалков В.Н. Теплофизические свойства компонентов горючих систем. М.: НПО "Информ ТЭИ", 1992. — 184 с.
8. Friedman R., Massek A. Ignition and combustion of aluminium particles in hot ambient gases // Combustion and Flame. — 1962. — V. 6. — N 1. — P. 9—19.
9. Фролов Ю.В., Похил П.Ф., Логачев В.С. Воспламенение и горение порошкообразного алюминия в высокотемпературных средах и составе гетерогенных конденсированных систем // ФГВ. — 1972. — Т. 8. — № 2. — С. 213—236.
10. Похил П.Ф., Беляев А.Ф., Фролов Ю.В. и др. Горение порошкообразных металлов в активных средах. М.: Наука, 1972. — 294 с.
11. Агеев Н.Д., Вовчук Я.И., Горошин С.В. и др. Стационарное горение твердых горючих. Ламинарный диффузионный двухфазный факел // ФГВ. — 1990. — Т. 26. — № 6. — С. 54—62.
12. Агеев Н.Д., Горошин С.В., Золотко А.Н. и др. Скорость стационарного пламени в газозвезях алюминия // Химическая физика процессов горения и взрыва. Горение гетерогенных и газовых систем. Материалы IX Всесоюзного симпозиума по горению и взрыву. — Черногловка. — 1989. — С. 83—85.
13. Goroshin S.V., Ageev N.D., Shoshin Yu.L. The premixed aluminium dust laminar flame // The 23 International Symposium on Combustion, France, 1990. Abstracts of Symposium Papers. — P. 137.
14. Лукашенин Г.В., Подгребенков А.Л. О температурном коэффициенте скорости горения некоторых систем // ЖФХ. — 1962. — Т. 36, № 12. — С. 2784—2786.
15. Найбороденко Ю.С., Лавренчук Г.В., Филатов В.М. и др. Механизм образования алюминидов циркония при безгазовом горении // Проблемы технологического горения. Т. 1. Кинетика, термодинамика, механизм и теория горения. Материалы III Всесоюзной конференции по технологическому горению. — Черногловка. — 1981. — С. 67—70.
16. Итин В.И., Братчиков А.Д., Лепинский А.Б. Фазовый переход при горении смесей меди и алюминия // ФГВ. — 1981. — Т. 17. — № 5. — С. 31—34.
17. Черненко Е.В., Афанасьева Л.Ф., Лебедева В.А., Розенбанд В.И. Воспламеняемость смесей окислов металлов с алюминием // ФГВ. — 1988. — Т. 24. — № 6. — С. 3—11.

141300, г. Сергиев Посад,
НИИПХ

Поступила в редакцию 15/V 1992,
после доработки — 29/III 1994

УДК 662.612.22

Л.А. Клячко, Е.С. Шахиджанов

ГОРЕНИЕ СМЕСЕЙ МАГНИЯ С НИТРАТОМ НАТРИЯ II. СКОРОСТЬ ГОРЕНИЯ ТРЕХКОМПОНЕНТНЫХ СМЕСЕЙ МАГНИЯ, НИТРАТА НАТРИЯ И ОРГАНИЧЕСКОГО ГОРЮЧЕГО

Предложена предельная схема процесса горения трехкомпонентных смесей магния, нитрата натрия и органического горючего. Получено приближенное уравнение для скорости горения таких смесей. Дано сопоставление экспериментальных и расчетных зависимостей скорости горения от состава смеси и внешнего давления.

В [1] рассмотрен вопрос о скорости горения двухкомпонентных смесей магния с нитратом натрия. При горении трехкомпонентной смеси магния,

© Л.А. Клячко, Е.С. Шахиджанов, 1994.

нитрата натрия и органического горючего (нафталина) картина процесса горения настолько усложняется, что становится возможным анализ только предельных схем процесса.

Первая предельная схема базируется на предположении о полном перемешивании продуктов разложения нитрата натрия с парами нафталина в непосредственной близости от поверхности смеси (в зоне влияния). Однако расчет, выполненный с использованием этой схемы, дает заниженные, резко отличающиеся от экспериментальных величин скорости горения и не в состоянии объяснить некоторые качественные особенности горения трехкомпонентных смесей¹.

Вторая предельная схема исходит из противоположного предположения о том, что в зоне влияния полностью отсутствует смешение (следовательно, и горение) паров нафталина с продуктами разложения нитрата натрия. Здесь задача о горении трехкомпонентной смеси сводится к задаче о горении некоторой эквивалентной двухкомпонентной смеси магния и нитрата натрия с учетом затрат тепла на нагрев и газификацию органического горючего. Следует заметить, что предлагаемый ниже метод расчета скорости горения трехкомпонентной смеси базируется на не всегда строгих допущениях и его следует рассматривать лишь как метод первого приближения.

Таким образом, предполагаем, что пары нафталина с продуктами разложения окислителя не смешиваются и в пределах зоны влияния в горении не участвуют, а нафталин лишь газифицируется и нагревается до температуры разложения нитрата натрия. Аналогично [1] предполагаем, что определенную роль играет горение частиц магния в кислороде, образовавшемся при переходе нитрата натрия в нитрат.

Пусть трехкомпонентная смесь состоит из массовых долей окислителя η , нафталина κ и магния $(1 - \eta - \kappa)$. Объемное содержание этих компонентов в смеси определяется из соотношений

$$r_{\text{ок}} = \frac{\eta \rho_{\text{T}}}{\rho_{\text{ок}}}, \quad r_{\text{ор}} = \frac{\kappa \rho_{\text{T}}}{\rho_{\text{ор}}}, \quad r_{\text{м}} = \frac{(1 - \eta - \kappa) \rho_{\text{T}}}{\rho_{\text{м}}}, \quad (1)$$

где ρ_{T} , $\rho_{\text{ок}}$, $\rho_{\text{ор}}$ и $\rho_{\text{м}}$ — плотности смеси, окислителя, органического горючего и магния.

Если предположить, что частицы магния равномерно распределены в объеме окислителя и нафталина, то в двухкомпонентной смеси нитрата натрия с магнием массовая доля окислителя

$$\eta_1 = \frac{\eta + \kappa \frac{\rho_{\text{ок}}}{\rho_{\text{ор}}}}{1 + \kappa \left(\frac{\rho_{\text{ок}}}{\rho_{\text{ор}}} - 1 \right)}. \quad (2)$$

Наоборот, если предположить, что частицы нитрата натрия равномерно распределены в объеме магния и нафталина, то массовая доля окислителя в двухкомпонентной смеси нитрата натрия с магнием

$$\eta_2 = \frac{\eta}{1 + \kappa \left(\frac{\rho_{\text{м}}}{\rho_{\text{ор}}} - 1 \right)}. \quad (3)$$

Примем в качестве эффективной массовой доли окислителя в двухкомпонентной смеси нитрата натрия с магнием среднеарифметическое значение η_1 и η_2

$$\eta^* = \frac{1}{2} (\eta_1 + \eta_2). \quad (4)$$

Когда содержание нафталина в смеси равно нулю, $\eta^* = \eta$.

¹Об этих особенностях речь пойдет в следующей статье, посвященной пределам горения.

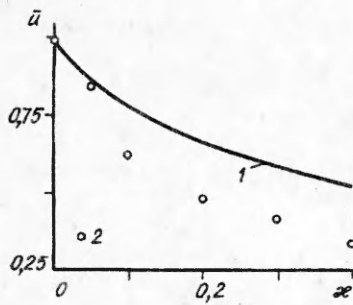


Рис. 1. Зависимость относительной скорости горения $\bar{u} = u/u_{x=0}$ от содержания нафталина в смеси; $d_{m0} = 105$ мкм, $p = 0,1$ МПа, $T_0 = 293$ К.

1 — расчет; 2 — эксперимент.

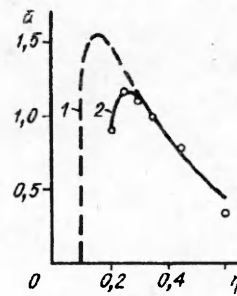


Рис. 2. Зависимость относительной скорости горения $\bar{u} = u/u_{\eta=0.35}$ от содержания нитрата натрия в смеси; $x = 0,1$, $d_{m0} = 105$ мкм, $p = 0,1$ МПа, $T_0 = 293$ К.

1 — расчет; 2 — эксперимент.

Так как в рассматриваемой предельной схеме процесса принимается, что нафталин в горении не участвует, то кондуктивный тепловой поток на его поверхность не поступает. На этой поверхности отсутствует также горение задерживающихся частиц магния.

Из соображений размерности следует, что поверхности компонентов относятся как их объемные доли в степени две трети. Тогда эффективная доля поверхности горения смеси, на которую поступает кондуктивный тепловой поток и на которой горят задерживающиеся частицы магния, определится из соотношения

$$\bar{S} = \frac{S_{ок} + S_m}{S_{ок} + S_m + S_{op}} = \frac{1 + \left[\frac{(1 - \eta - x)\rho_{ок}}{\eta\rho_m} \right]^{2/3}}{1 + \left[\frac{(1 - \eta - x)\rho_{ок}}{\eta\rho_m} \right]^{2/3} + \left[\frac{x\rho_{ок}}{\eta\rho_{op}} \right]^{2/3}} \quad (5)$$

Дальнейший расчет выполняем для эквивалентной двухкомпонентной смеси магния с нитратом натрия аналогично [1] с учетом затрат тепла на нагрев и газификацию нафталина. Принимая во внимание эти замечания, представим уравнение, определяющее скорость горения трехкомпонентной смеси:

$$A_T y^{1,8} = \bar{S}(B_k + C_\phi y) + Q_R d_{m0} y^{0,8} \quad (6)$$

В этом уравнении, по-прежнему, $y = u d_{m0}$, а величины B_k , Q_R и C_ϕ определяются формулами (11а), (12), и (14а) статьи [1] с той только разницей, что для трехкомпонентной смеси в формулы (11а) и (14а) следует подставлять не значение η , а η^* — массовую долю окислителя в эквивалентной двухкомпонентной смеси магния с нитратом натрия.

Для трехкомпонентной смеси

$$A_T = \rho_T \{ \eta l_{ок} + x l_{op} + (1 - \eta - x) l_m^{пл} + [(1 - x)c_T + x c_{op}] (T_\psi - T_0) \}, \quad (7)$$

где дополнительно (по отношению к [1]) введены обозначения: l_{op} , c_{op} — теплота сублимации и удельная теплоемкость нафталина. Из-за большого различия между теплоемкостями нафталина и остальных компонентов смеси затраты тепла на его нагрев выделены отдельно.

При проведении расчетов дополнительно использовались следующие значения физических констант [2]: $\rho_m = 1740$ кг/м³, $\rho_{ок} = 2260$ кг/м³ и $\rho_{op} = 1000$ кг/м³ (при $T_0 = 293$ К), $l_{op} = 515$ кДж/кг, $c_{op} = 1,99$ кДж/(кг·К) (в диапазоне 293—1000 К). Сопоставление результатов расчета с экспериментальными данными представлено на рис. 1—3.

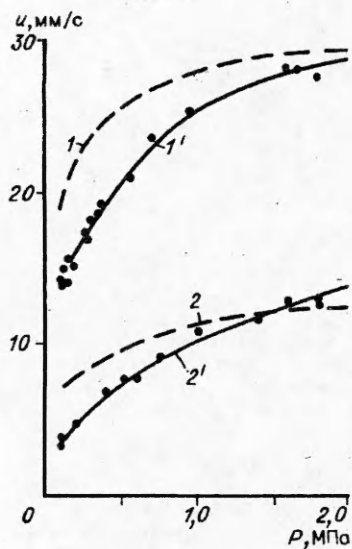


Рис. 3. Зависимость скорости горения от давления; $d_{м0} = 105$ мкм, $T_0 = 293$ К.
1, 2 — расчет, 1', 2' — эксперимент при $\eta = 0,25, \kappa = 0,10$ (1') и при $\eta = 0,5, \kappa = 0,25$ (2').

На рис. 1 приведена зависимость относительной скорости горения смеси от содержания в ней нафталина при постоянном значении отношения массовых долей магния и нитрата натрия ($1 - \eta - \kappa/\eta \approx 2,0$). С ростом κ скорость горения смеси снижается, что связано с уменьшением эффективной поверхности \bar{S} , возрастанием доли окислителя в двухкомпонентной смеси и некоторым увеличением затрат тепла на ее газификацию. Расчетная зависимость $\bar{u} = f(\kappa)$ удовлетворительно согласуется с экспериментальными данными.

Влияние содержания окислителя в смеси на скорость ее горения при постоянной массовой доле нафталина отражено на рис. 2. Как видим, зависимость $\bar{u} = f(\eta)$ имеет тот же вид, что и для двухкомпонентной смеси [1]. Расчет показывает некоторое смещение положения максимума скорости горения в сторону меньших значений коэффициента избытка окислителя, что связано, по-видимому, с неточностью принятой предельной схемы процесса горения трехкомпонентной смеси при малом содержании окислителя.

Изменение скорости горения топлива в зависимости от внешнего давления инертной среды для трехкомпонентных смесей различного состава представлено на рис. 3. Расчетные зависимости близки к экспериментальным и адекватно отражают влияние состава смеси на скорость ее горения при разных давлениях среды. Расчетные и экспериментальные зависимости скорости горения трехкомпонентных смесей от дисперсности частиц магния и начальной температуры смеси аналогичны таковым для двухкомпонентных смесей магния с нитратом натрия.

Таким образом, рассмотренная предельная схема процесса горения трехкомпонентных смесей магния, нитрата натрия и нафталина позволяет в основных чертах описать характер наблюдаемых в опыте закономерностей горения таких смесей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кашпоров Л.Я., Клячко Л.А., Силин Н.А., Шахиджанов Е.С. Горение смесей магния с нитратом натрия. 1. Скорость горения двухкомпонентных смесей магния с нитратом натрия // ФГВ. — 1994. — 30, № 5.
2. Физико-химические свойства индивидуальных углеводородов // Под ред. В.М. Татевского. — Гостоптехиздат, 1960. — 290 с.

141300, г. Сергиев Посад,
НИИПХ

Поступила в редакцию 17/VII 1993,
после доработки — 11/III 1994