

- энергии в реакции аррениусовского типа // Хим. физика.— 1988.— 7, № 2.— С. 263.
91. Cheng R. K., Short J. M. et al. Diagnostics of the exothermic process // Progr. Astr. Aeron.— N. Y., AIAA Inc., 1977.— 53.— P. 644.
 92. Аксаментов С. М., Киселев И. А. и др. Численное исследование условий распада детонации в области с неоднородным распределением температуры и концентрации // ФГВ.— 1991.— 27, № 5.— С. 130.
 93. Terao K., Azumatei T. Cellular pattern formation in detonation waves as a stochastic phenomenon // Jap. J. Appl. Phys.— 1989.— 28, N 4.— P. 723.
 94. Войцеховский Б. В., Митрофанов В. В., Топчий М. Е. Структура фронта детонации в газах.— Новосибирск: Изд-во СО АН СССР, 1963.— 168 с.
 95. Дремин А. Н. Пульсирующий детонационный фронт // ФГВ.— 1983.— 19, № 4.— С. 159.
 96. Takano Y. Simulations for detonation initiation behind reflected shock waves // Proc. 13th ICDERS, Nagoya, 1991, 27.
 97. Hasegawa T., Arai A. et al. Autoignition of a turbulent premixed gas // Ibid.— P. 158.
 98. Lefebvre M. M., Oran W. S. et al. Simulation of cellular structure in a detonation wave // Ibid.— P. 4.

г. Москва

Поступила в редакцию 2/III 1992

УДК 662.611

*Н. А. Силин, Л. Я. Кашипов, Ю. Е. Шелудяк,
З. Э. Асмагулло, А. Г. Распопин, Р. А. Гринеева*

ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ СКОРОСТИ ГОРЕНИЯ СМЕСЕЙ $Mg + NaNO_3$ ОТ МНОГИХ ПЕРЕМЕННЫХ

На основании анализа экспериментальных данных построены функциональные зависимости скорости горения смесей магния с нитратом натрия от начальной температуры, пористости, дисперсности компонентов, содержания магния в смеси и давления.

Смеси магния с нитратом натрия используются в качестве основы различных гетерогенных конденсированных систем (ГКС) [1], и поэтому исследованию процессов воспламенения и горения этих смесей посвящено большое число экспериментальных работ [2—10]. Однако во многих случаях результаты этих исследований плохо согласуются между собой, что обусловлено не только погрешностями эксперимента и некорректностью фиксации параметров, влияющих на процесс горения, но и отсутствием единого, физически обоснованного подхода к интерпретации экспериментальных данных.

В настоящей работе предпринята попытка получения функциональной зависимости скорости горения u смесей магния с нитратом натрия от начальной температуры T_n , давления p , пористости Π , дисперсности компонентов d_i и содержания компонентов в смеси x_i с учетом установленных в работах [11—13] закономерностей стационарного горения.

В основе анализа экспериментальных данных лежит уравнение для массовой скорости горения

$$u\rho = \frac{q_m}{h_{\max} - h(T_n)}, \quad (1)$$

являющееся интегральной формой закона сохранения энергии на условной границе зоны химических реакций и прогретого слоя. В (1): ρ и $h(T_n)$ — плотность и энтальпия горючей системы при T_n ; q_m — тепловой поток на условной границе зоны химических реакций и прогретого слоя; h_{\max} — максимальное количество тепла, которое можно ввести в реакционноспособную систему при условиях нагрева, соответствующих установившемуся режиму горения. Анализ экспериментальных данных о скорости горения различных горючих систем показывает, что параметры

h_{\max} и q_m не зависят от начальной температуры [11—13]. Температура условной границы зоны химических реакций и прогретого слоя определяется из соотношения [12]

$$T_m = \frac{E}{2R} - \sqrt{\left(\frac{E}{2R}\right)^2 - \frac{E}{R} T^*}, \quad (2)$$

где E — энергия активации; R — универсальная газовая постоянная; T^* — температура, до которой можно нагреть инертную систему количеством тепла h_{\max} . Уравнение (2) совпадает с выражением для температуры самовоспламенения газовой смеси, помещенной в сосуд с температурой стенок T^* [14]. Поэтому условную границу зоны химических реакций и прогретого слоя можно назвать поверхностью воспламенения горючей системы волной стационарного горения.

В соответствии с (1) значение u определяется только параметрами h_{\max} и q_m , и влияние различных факторов на u должно проявляться в той мере, в какой от них зависят h_{\max} и q_m , а также плотность ρ и энтальпия h горючей системы. Поэтому в общем случае скорость горения должна определяться уравнением

$$u\rho(T_n, p, x_i) = \frac{q_m(p, \Pi, d_i, x_i, \dots)}{h_{\max}(p, \Pi, d_i, x_i, \dots) - h(T_n, p, x_i)}, \quad (3)$$

для построения которого необходимо располагать экспериментальными зависимостями $u(T_n)$ при различных значениях p , Π , d_i , x_i и зависимостями плотности и энтальпии от температуры, давления и состава смеси.

Несмотря на большое число экспериментальных работ, в которых определяли скорость горения смесей $Mg + NaNO_3$, только в [5] исследования проведены в широкой области $T_n = 213—473$ К, достаточной для надежного определения тепловых параметров волны горения. В [5] использовали образцы высотой 20 мм, запрессованные в бумажные оболочки с внутренним диаметром 15 и толщиной стенки 1 мм.

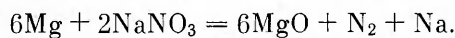
Нагревание (охлаждение) до T_n и последующее сжигание образцов осуществлялось в массивных стальных капсулах. Пористость Π образцов изменялась от 0,02 до 0,3, средний размер частиц окислителя $d_o = 28 \div 490$ мкм, средний размер частиц магния $d_{Mg} = 18 \div 182$ мкм (использовались магниевые порошки марок МПФ-5, МПФ-3, МПФ-2), массовое содержание Mg в смеси $x_{Mg} = 0,380 \div 0,707$. При каждом значении T_n и других факторов получено от 3 до 5 экспериментальных величин скорости горения. Максимальные отклонения экспериментальных данных от средних не превышали 5 %.

Плотность и энтальпию смесей $Mg + NaNO_3$ вычисляли по аддитивным формулам

$$\rho = (1 - \Pi) \left(\frac{x_M}{\rho_M} - \frac{x_o}{\rho_o} \right)^{-1}, \quad h = h_{Mg}x_{Mg} + h_o x_o.$$

Величины ρ и h при температуре T_n рассчитывали по формулам, полученным на основе справочных данных [15—17] о температурных зависимостях теплоемкости и коэффициента теплового расширения. За начало отсчета энтальпии принято $T_n = 293,15$ К.

Большинство исследований [5] проведено для смеси 46,2 % $Mg + 53,8$ % $NaNO_3$, соответствующей стехиометрическому составу для химической реакции горения



Зависимости $(u\rho)^{-1} = f(h)$ для этой смеси показаны на рис. 1. Экспериментальные данные в координатах $h(T_n)$, $(u\rho)^{-1}$ укладываются на прямые линии, наклон которых, в соответствии с уравнением (1), равен q_m^{-1} , а отсекаемое на оси абсцисс значение $h(T_n)$ определяет величину h_{\max} . Как видно из рис. 1, максимальная энтальпия $Mg + NaNO_3$

Рис. 1. Зависимости обратной массовой скорости горения смеси $Mg + NaNO_3$ ($d_0 = 120$ мкм, $d_{Mg} = 130$ мкм, $x_{Mg} = 0,462$) от энтальпии при $\Pi = 0,02$ (1), 0,2 (2) и 0,3 (3).

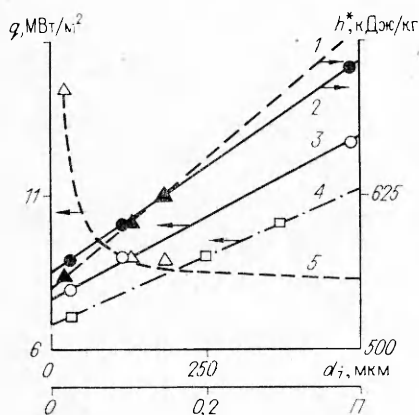
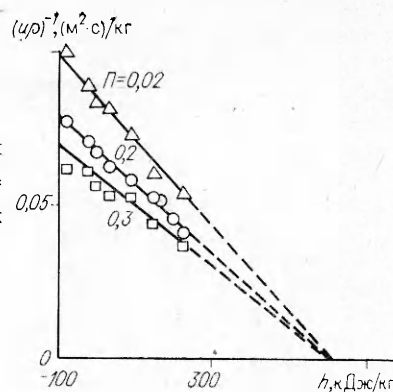
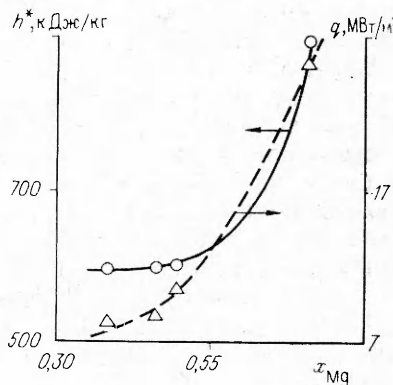


Рис. 2. Зависимости максимальной энтальпии (темные точки) и теплового потока (светлые точки) от среднего размера компонентов и пористости смеси при $x_{Mg} = 0,462$, $\Pi = 0,2$ (1-3, 5). 1 - $h_{max}(d_{Mg})$, $d_0 = 120$ мкм; 2 - $h_{max}(d_0)$, $d_{Mg} = 130$ мкм; 3 - $q_m(d_0)$, $d_{Mg} = 130$ мкм; 4 - $q_m(\Pi)$, $d_0 = 120$ мкм, $d_{Mg} = 130$ мкм; 5 - $q_m^f(d_{Mg})$, $d_0 = 120$ мкм.

Рис. 3. Зависимости тепловых параметров волны горения ($\Pi = 0,2$, $d_0 = 120$ мкм, $d_{Mg} = 130$ мкм) от содержания магния.



не зависит от Π , а q_m увеличивается с ростом Π . Всю совокупность показанных на рис. 1 данных в пределах погрешности эксперимента можно описать уравнением

$$u_0 = \frac{q_0 + q_1 \Pi}{h_{max} - h(T_H)}, \quad (4)$$

где $h_{max} = 612,6$ кДж/кг, $q_0 = 6825$ кВт/м², $q_1 = 11251$ кВт/м², а массовая скорость горения имеет размерность кг/(м² · с).

Аналогично получим тепловые параметры волны горения смесей $Mg + NaNO_3$ при изменении дисперсности компонентов и их содержания в смеси. На рис. 2 показаны зависимости h_{max} и q_m стехиометрической смеси $Mg + NaNO_3$ от d_0 , d_{Mg} и Π . Значения h_{max} линейно возрастают при увеличении d_0 и d_{Mg} , а вся совокупность оценок максимальной эн-

тальшии стехиометрической смеси и теплового потока описывается выражениями

$$h_{\max}^c = 503,88 + 36025d_o + 0,42257d_{Mg}, \text{ кДж/кг}, \quad (5)$$

$$q_m^c = 4627,3 + 1112,6\Pi + 9,9613d_o + \frac{117395}{d_{Mg}}, \text{ кВт/м}^2. \quad (6)$$

Здесь d_o и d_{Mg} выражены в микрометрах.

На рис. 3 показаны значения параметров h_{\max} и q_m в зависимости от содержания Mg при фиксированных значениях Π , d_o и d_{Mg} . В области $x_{Mg} = 0,38 \div 0,5h_{\max}$ и q_m изменяются сравнительно мало и резко возрастают при увеличении содержания магния до $x_{Mg} = 0,707$.

Введем соотношения $K_q = q_m(x_{Mg})/q_m^c$ и $K_h = h_{\max}(x_{Mg})/h_{\max}^c$. Тогда экспериментальные данные рис. 3 в области $0,38 \leq x_{Mg} \leq 0,707$ можно описать выражениями

$$K_q = 3,7325 - 14,482x_m + 18,686x_{Mg}^2, \quad (7)$$

$$K_h = -1,1706 + 14,9279x_{Mg} - 34,1108x_{Mg}^2 + 25,9061x_{Mg}^3. \quad (8)$$

Значения h_{\max}^c и q_m^c вычисляются по (5) и (6), определяющим тепловые параметры волны горения смеси при стехиометрическом содержании магния $x_{Mg} = 0,462$.

Таким образом, зависимость скорости горения смесей $Mg + NaNO_3$ от содержания магния, пористости и дисперсности компонентов определяется уравнением

$$u_p = \frac{q_m^c(\Pi, d_o, d_{Mg})K_q(x_{Mg})}{h_{\max}^c(d_o, d_{Mg})K_h(x_{Mg}) - h(T_n, x_{Mg})}. \quad (9)$$

Уравнение (9) описывает всю совокупность исходных экспериментальных данных [5] о скорости горения смеси, рассматриваемой в пределах их разброса: отклонения средних экспериментальных значений от расчетных в основном не превышают 3 %.

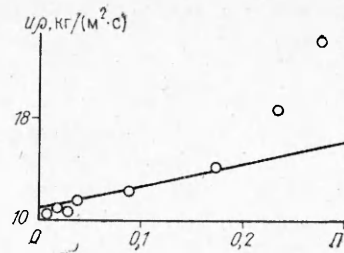
Располагая выражением (9), можно проводить сопоставление результатов исследований, полученных в различных условиях, а также оценивать чувствительность процесса горения к изменению начального теплового состояния и отдельных характеристик смеси: пористости уплотненной смеси, дисперсности и содержания компонентов.

Кроме использованных при составлении уравнения (9) значений скорости горения, в работе [5] представлены зависимости $u(T_n)$ для стехиометрической смеси $Mg + NaNO_3$, полученные на образцах, запрессованных в бумажную оболочку с внутренним диаметром 23 мм ($\Pi = 0,3$, $d_o = 120$ мкм, $d_{Mg} = 182$ мкм), и на образцах, запрессованных в медную оболочку с внутренним диаметром 15 мм ($\Pi = 0,2$, $d_o = 120$ мкм, $d_{Mg} = 130$ мкм).

Экспериментальные значения скорости горения для образца диаметром 23 мм практически совпадают с рассчитанными по (9) при $T_n = 293$ и 473 К (отклонения составляют 1,7 и 1,1 % соответственно), а при $T_n = 213$ К экспериментальное значение на 8,2 % выше расчетного. Результаты измерений скорости горения смеси в медных оболочках выше значений, полученных в бумажных оболочках, на 43,6; 39,1 и 30,1 % при $T_n = 213, 293$ и 473 К соответственно.

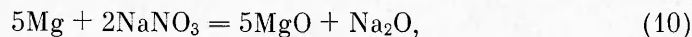
Увеличение скорости сгорания смеси в высокотеплопроводных оболочках обусловлено увеличением поверхности горения из-за ускоренного выгорания прилегающего к оболочке слоя в результате его дополнительного подогрева. Однако формально можно полагать, что в данном случае происходит равномерное послойное горение при дополнительном подводе тепла Δq из зоны химических реакций к условной границе зоны химических реакций и прогретого слоя. Используя вычисленные по уравнению (5) $h_m = 602$ кДж/кг и $q_m = h_{\max}(u_p)_{293} = 12\,334$ кВт/м², соответ-

Рис. 4. Сопоставление данных [2] о зависимости массовой скорости горения смеси Mg + NaNO₃ от пористости при T = 293 К (d_o = d_{Mg} = 94 мкм, x_{Mg} = 0,416) с расчетом по формуле (9).



ствующее скорости горения при T_n = 293 К (дополнительный теплоподвод по [5] при горении в бумажной оболочке составляет 3285 кВт/м²), рассчитаем величину u при T_n = 213 и 473 К. Экспериментальное значение на 4 % выше расчетного при T_n = 213 К и ниже на 5,9 % при T_n = 473 К. Эти отклонения можно объяснить изменением температуры образца за время от окончания термостатирования до начала горения.

В работе [2] исследованы скорости горения смеси 41,6 % Mg + 58,4 % NaNO₃, соответствующей стехиометрическому составу для химической реакции горения



в области T_n = 233 ÷ 333 К на образцах, запрессованных в железную оболочку с внутренним диаметром 15 мм (Π = 0,22, d_o = d_{Mg} = 94 мкм).

Для этой смеси расчет по (5) дает h_{max} = 576,3 кДж/кг, а соответствующая экспериментальному значению скорости горения при T_n = 293 К величина теплового потока q_m = 11 785 кВт/м². Дополнительный теплоподвод относительно данных [5] при горении в бумажной оболочке Δq = 3065 кВт/м² и хорошо согласуется со значением Δq, полученным из данных [5] при горении в медной оболочке. Экспериментальные значения u [2] выше расчетных на 5,2 % при T_n = 233 К и ниже на 1,9 % при T_n = 333 К. Эти отклонения лежат в пределах погрешности экспериментов, однако носят систематический характер, что может быть связано с отклонением действительной температуры образца в момент поджига от номинальной из-за его нагрева (охлаждения) в результате выдержки при комнатной температуре в течение времени транспортировки и подготовки к измерениям.

На рис. 4 сопоставлена экспериментальная зависимость [2] uρ = f(Π), полученная на образцах, запрессованных в бумажную оболочку с внутренним диаметром 15 мм, с рассчитанной по уравнению (9). В области Π = 0 ÷ 0,17 экспериментальные и расчетные значения uρ согласуются в пределах погрешности эксперимента. При более высоких Π отклонения результатов [2] от рассчитанной на основании данных [5] прямой резко возрастают и составляют 23 и 47 % при Π = 0,23 и 0,27 соответственно. Большое расхождение здесь может быть обусловлено погрешностью эксперимента или различием условий теплообмена, или воздействием неучтенных при проведении эксперимента факторов.

Полученные зависимости q_m(Π, d_o, d_{Mg}, x_{Mg}) и h_{max}(d_o, d_{Mg}, x_{Mg}) имеют чисто эмпирический характер, но в дальнейшем возможно построение и теоретически обоснованных зависимостей на основании того, что q_m определяется протеканием высокотемпературных химических реакций и процессами теплообмена, а h_{max} — природой горючей системы и протеканием химических реакций в прогретом слое.

Одна из важнейших характеристик процесса горения — температурный коэффициент скорости горения

$$\beta = \left[\frac{\partial \ln(u\rho)}{\partial T_n} \right]_p = \frac{c_p(T_n, x_{\text{Mg}})}{h_{\text{max}}^c(d_o, d_{\text{Mg}}) K_h(x_{\text{Mg}}) - h(T_n, x_{\text{Mg}})}. \quad (11)$$

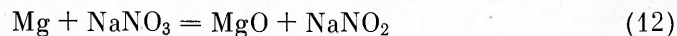
Из (11) видно, что β не зависит от высокотемпературных химических реакций и условий теплообмена, а определяется теплофизическими

свойствами горючей системы и протеканием химических реакций в прогретом слое, т. е. является внутренней характеристикой горючей системы.

Значения h_{\max} из [5] соответствуют нагреву инертной системы до $T^* = 629 \div 754$ К при $x_{\text{Mg}} = 0,38 \div 0,5$; а при $x_{\text{Mg}} = 0,707$ — до температуры плавления магния 923 К и теплоте плавления 7 % Mg. При исследовании процессов воспламенения смесей Mg + NaNO₃ получены значения $E = 117,2 \div 185,5$ кДж/моль [3, 4, 6], а $T^* = 629 \div 754$ К соответствуют температурам воспламенения горючей системы волной стационарного горения $T_m = 648 \div 799$ К.

По данным [3], для смеси Mg + NaNO₃ $T_v = 823$ К при времени задержки воспламенения ~ 30 с, а по результатам дериватографических исследований [4] $T_v = 813$ и 886 К при $x_{\text{Mg}} = 0,6$ и 0,22. Полученные значения T_m для большинства смесей ниже оценок температуры воспламенения T_v . Различие можно объяснить тем, что при исследовании горения использовались прессованные образцы, а при воспламенении порошки. Деформация частиц Mg при прессовании нарушает целостность окисной пленки, что приводит к облегчению воспламенения. Отметим, что в опытах по воспламенению компактных образцов нержавеющей стали в кислороде [18] обнаружено существенное снижение величины T_v при вынужденном разрушении образцов.

Согласно [6], первоначальное тепловыделение, приводящее к воспламенению смесей Mg + NaNO₃, обеспечивается протеканием химической реакции



с разложением нитрата до нитрита и выделением атомарного кислорода. Образовавшийся нитрит натрия разлагается до окисла с выделением азота и кислорода и дальнейшим окислением магния в соответствии с реакцией (10). Значение h_{\max} определяется протеканием предвоспламенительных реакций в прогретом слое.

Возможно, что сравнительно слабое изменение h_{\max} при $x_{\text{Mg}} \leq 0,5$ связано с протеканием реакции (12), а если $x_{\text{Mg}} = 0,707$, воспламенение горючей системы волной стационарного горения обеспечивается протеканием химической реакции (10). В этом случае закономерности горения при высоком содержании магния в смеси могут быть совершенно иными, чем при $x_{\text{Mg}} \leq 0,5$.

Влияние давления на скорость горения составов Mg + NaNO₃ рассмотрено в работах [2, 9, 10]. Зависимость $u(p)$ [2] исследована при комнатной температуре в области давлений 1—130 кг/см² на таких же образцах, как при анализе зависимости $u(T_n)$. В [2] получено

$$u = u_0 p^\nu$$

с $\nu = 0,223$, $u_0 = 13,42$ мм/с в области $p = 1 \div 20$ кг/см²; $\nu = 0,0992$, $u_0 = 19,84$ мм/с при $p = 20 \div 40$ кг/см²; $\nu = 0,0175$, $u_0 = 26,73$ мм/с, $p = 40 \div 130$ кг/см². Опыты [9] проведены при комнатной температуре в области $p = 1 \div 88$ кг/см² на бронированных с боковой поверхности прямоугольных образцах $4 \times 4 \times 22$ мм, запрессованных при давлении 3900 кг/см². Содержание Mg в смеси соответствовало стехиометрическому составу для реакции (10), $d_{\text{Mg}} = 50$ мкм. Несмотря на различие характеристик исходных смесей, данные [2] и [9] в пределах их разброса совпадают. При $p = 35$ кг/см² исследования [9] проведены в среде азота и кислорода и получены совпадающие в пределах погрешности измерений результаты.

В [10] рассматривалась область давления от 1,7 до 38,5 кг/см² при горении смесей Mg + NaNO₃, $T_n = 233 \div 323$ К. Измерения проведены на цилиндрических образцах диаметром 108 и длиной 200 мм, бронированных эпоксидной смолой. Плотность образцов составляла 1600 кг/м³, содержание магния в смеси 40, 50, 60 и 70 %. Скорость горения определялась в модельном двигателе из зависимости давления от времени.

Требуемое давление в камере сгорания достигалось изменением площади сечения сопла двигателя.

При $x_{Mg} = 0,4$, близком к стехиометрическому содержанию магния для реакции (10), аналогично [2, 9], наблюдался излом зависимости $\ln u = f(\ln p)$ при $p = 20$ кг/см², а показатель ν уменьшался от 0,5 до 0,12 и от 0,35 до 0,09 при $T_n = 233$ и 323 К. В случае $x_{Mg} = 0,5 \div 0,7$ линейность $\ln u = f(\ln p)$ сохранялась во всей области давлений, а $\nu = 0,03$ при $x_{Mg} = 0,7$.

Выделенные из данных [10] значения q_m и h_{max} увеличиваются с ростом давления и могут быть аппроксимированы уравнениями:

$$\begin{aligned} h_{max}(p) &= 120 + 12,15p, \text{ кДж/кг}, \\ q_m(p) &= 880 + 580p, \text{ кВт/м}^2 \end{aligned}$$

при $x_{Mg} = 0,4$;

$$h_{max}(x_{Mg}, p) = -800 + 3000x_{Mg} + 10p, \text{ кДж/кг}, \quad (13)$$

$$q_m(x_{Mg}, p) = \sum_{i=0}^2 A_i(x_{Mg}) p^i, \text{ кВт/м}^2$$

при $x_{Mg} = 0,5-0,7$;

$$A_0(x_{Mg}) = 170940 - 785260x_{Mg} + 1006240x_{Mg}^2,$$

$$A_1(x_{Mg}) = -791,7 + 4278x_{Mg} - 954,4x_{Mg}^2,$$

$$A_2(x_{Mg}) = 26,2 - 104,7x_{Mg} + 68,5x_{Mg}^2.$$

Отмеченное в работе [10] уменьшение показателя ν при росте T_n непосредственно вытекает из выражения (3), в соответствии с которым

$$\nu = \left[\frac{\partial \ln(u\rho)}{\partial \ln p} \right]_{T_n} = \frac{p}{q_m(p)} \frac{dq_m(p)}{dp} - \frac{p}{h_{max}(p) - h(T_n)} \frac{dh_{max}p}{dp}. \quad (14)$$

Температурная зависимость показателя ν определяется вторым членом уравнения (14), который при положительном значении производной $\frac{dh_{max}(p)}{dp}$ приводит к уменьшению ν с ростом T_n .

Выделенные из данных [10] значения h_{max} при $x_{Mg} = 0,4$ очень малы и соответствуют нагреву инертной смеси до $T^* = 416$ и 560 К при $p = 2$ и 20 кг/см², которые заведомо ниже температуры воспламенения смеси. Подобное поведение наблюдается при горении нитроглицеринового пороха в области низких p и T_n [13], что обусловлено очагово-пульсирующим режимом горения пороха при этих условиях [19].

При $x_{Mg} = 0,5$ значения h_m соответствуют нагреву инертной смеси до $T^* = 750$ К при $p = 2$ кг/см² и до температуры плавления магния $T^* = 923$ К при $p = 30$ кг/см². При $x_{Mg} = 0,6 \div 0,7$ значения h_{max} соответствуют нагреву инертной смеси до $T^* = 923$ К с различной долей расплавленного магния или до более высоких температур. Наибольшее значение $h_{max} = 1600$ кДж/кг при $x_{Mg} = 0,7$, $p = 30$ кг/см² соответствует $T^* = 1260$ К.

Экстраполяция зависимости (13) к $p = 1$, $x_{Mg} = 0,7$ дает $h_{max} = 1310$ кДж/кг, что намного выше полученного из данных [5] $h_{max} = 897$ кДж/кг при $x_{Mg} = 0,707$, $d_o = 120$ мкм, $d_{Mg} = 130$ мкм. Однако для согласования результатов [10] с $h_{max} = 897$ кДж/кг достаточно увеличить значение u при $T_n = 233$ К на 2,3 % и уменьшить на 1 % при $T_n = 323$ К. Поэтому возможно, что на основании более тщательных экспериментальных исследований удастся построить единое уравнение для скорости горения системы $Mg + NaNO_3$ в зависимости от всех факторов, включая давление.

Система $Mg + NaNO_3$ является единственной гетерогенной конденсированной системой, для которой исследованы подробные зависимости $u(T_n)$ при варьировании в широких пределах влияющих на скорость горения факторов, что позволило построить для нее единое уравнение

скорости горения (9). Но и для этой системы необходимы дальнейшие экспериментальные исследования, так как в ряде случаев наблюдаются не только количественные, но и качественные расхождения закономерностей горения.

Обычно исследования влияния различных факторов на скорость горения подобных систем проводятся при комнатной температуре. Анализ состава $Mg + NaNO_3$ показывает, что установление закономерностей горения возможно только в виде их взаимосвязи в функциональной зависимости (3). Для построения такого уравнения необходимо располагать экспериментальными зависимостями $u(T_n)$ при различных значениях влияющих на скорость горения факторов и температурными зависимостями плотности и энтальпии горючих систем.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шидловский А. А. Основы пиротехники.— М.: Машинностроение, 1973.— 320 с.
2. Силин Н. А. Дис. ... канд. техн. наук.— Л.: ЛТИ им. Ленсовета, 1955.— 176 с.
3. Freeman E. S., Gordon S. The application of the absolute rate theory to the ignition of propagatively reacting systems. The thermal ignition of the systems lithium nitrate-magnesium, sodium nitrate-magnesium // J. Phys. Chem.— 1956.— 60, N 7.— P. 867—871.
4. Hogan V. D., Gordon S. Pre-ignition and ignition reactions of the propagatively reacting system magnesium-sodium nitrate-laminac // Combust. Flame.— 1959.— 3, N 1.— P. 3—12.
5. Чернышева Е. С. Дис. ... канд. техн. наук.— Л.: ЛТИ им. Ленсовета, 1965.— 220 с.
6. Bond B. D., Jacobs P. W. M. Chemical reaction and ignition in mixtures of magnesium and sodium nitrate // Combust. Flame.— 1966.— 10, N 4.— P. 349—354.
7. Eisel J. L. Observations of the surface details of burning $Mg/NaNO_3$ /binder flares // Proc. Third Int. Pyrotechnics Seminar.— Denver Research Inst/Univ. Denver.— 1972.— P. 435—443.
8. Beardell A. J., Anderson D. A. Factors affecting the stoichiometry of the magnesium nitrate combustion // Ibid.— P. 445—459.
9. Ward J. R., Decker L. J., Barrows A. W. Burning rates of pressed strands of stoichiometric magnesium-sodium nitrate mix // Combust. Flame.— 1983.— 51, N 1.— P. 124—123.
10. Singh H., Rao B. B. Temperature sensitivity of magnesium-sodium nitrate propellants // Propellants, Explosives, Pyrotechnics.— 1990.— 15, N 6.— P. 250—253.
11. 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 Всесоюз. симп. по горению и взрыву.— Черноголовка, 1989.— С. 18—21.
12. Кашпоров Л. Я., Рабинович В. А., Шелудяк Ю. Е. Теплофизические аспекты процесса горения // Теплофизические свойства веществ и материалов.— М.: Изд-во стандартов, 1991.— Вып. 30.— С. 139—147.
13. Кашпоров Л. Я., Шелудяк Ю. Е., Мальцев В. М. и др. Влияние температурной зависимости плотности на оценки тепловых параметров волны горения нитроглицериновых порохов // ФГВ.— 1992.— 28, № 3.— С. 8—13.
14. Семенов П. Н. Цепные реакции.— М.: Наука, 1986.— 535 с.
15. Термодинамические свойства индивидуальных веществ: Справочное издание в 4-х томах/Л. В. Гурвич, И. В. Вейц, В. А. Медведев и др.— М.: Наука, 1978—1982.
16. Новикова С. И. Тепловое расширение твердых тел.— М.: Наука, 1974.— 292 с.
17. Шелудяк Ю. Е., Кашпоров Л. Я., Малинин Л. А. и др. Теплофизические свойства уплотненных порошков. I. Неорганические кислородсодержащие соединения // ИФЖ.— 1990.— 59, № 2.— С. 319.
18. Болобов В. Н., Березин А. Ю., Дрожжин П. Ф. и др. Воспламенение компактных образцов нержавеющей стали в кислороде высокого давления // ФГВ.— 1991.— 27, № 3.— С. 3—7.
19. Маршаков В. Н. Параметры очагово-пульсирующего режима горения нитроглицеринового пороха // Хим. физика.— 1987.— 6, № 4.— С. 530—537.

г. Сергеев Посад

Поступила в редакцию 7/II 1992