

Определе- ния	Законы распределения			Параметр
	$f(t)$	$Q(t)$	$P(t)$	$\lambda(t)$
Экспонен- циальный	$f(t) = \lambda \cdot e^{-\lambda t}$ 	$Q(t) = 1 - e^{-\lambda t}$ 	$P(t) = e^{-\lambda t}$ 	$\lambda(t)$
γ распреде- ление	$f(t)$ 	$Q(t)$ 	$P(t)$ 	$\lambda(t)$
Вейбулла	$f(t)$ 	$Q(t)$ 	$P(t)$ 	$\lambda(t)$
Нормаль- ный	$f(t)$ 	$Q(t)$ 	$P(t)$ 	$\lambda(t)$

Рисунок 2 - Зависимость показателей надежности от функции распределения

SUMMARY

Technique of account of the time admission of a closing link of a time chains is submitted construction of rational processes of automated assembly.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Планирование гибких производственных систем/Петров В.А., А.Н. Масленников, Л.А.Осипов. - Л.: Машиностроение, 1985. - 182 с.
2. Балакшин Б.С. Основы технологии машиностроения. - М.: Машиностроение, 1969. - 358 с.
3. Васильев В.Н. Организация, управление и экономика гибкого интегрированного производства в машиностроении. - М.: Машиностроение, 1986. - 312 с.
4. Проектирование технологии /Под. общ. ред. Ю.М. Соломенцева - М.: Машиностроение, 1990. - 416 с.
5. Constraint Representation and reduction in Assembly modeling and Analysis/ Turner Joshua U., Sudramaniam Svikanth, Gupta Sujajit // IEEE Trans. Rob. and Autom. -1992. - 8. - №6 - P.741-750.
6. Santos J., Siemaszko A., Gollwitzer S., Rackwitz R. Continuum sensitivity method for reliability - based structural design and optimization// Mechanics of structures and machines. - 1995.- Vol.23. -N 4. -P.497-520.

Поступила в редколлегию 2 декабря 1998 г.

УДК 536. 241. 46

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПРЕДЕЛОВ ГОРЕНИЯ МЕТАЛЛИЗИРОВАННЫХ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СИСТЕМ

В.А.Ващенко, проф.; П.И.Заика; Д.М.Краснов, доц.; С.И.Сташенко;
Ю.И.Кикоть
(Черкасский инженерно-технологический институт)

Термодинамические методы расчетов процессов горения различных систем нашли широкое применение в практике проектирования

различных изделий народного хозяйства и военной техники (пороха взрывчатые вещества, твердые ракетные топлива, средства аэродинамической техники и др.) [1-8]. Они позволяют рассчитывать температуру, состав и свойства продуктов сгорания и, что очень важно, судить о степени химической равновесности в продуктах сгорания и обеспечивать ее заданный уровень на выходе из изделия в окружающей среде. Эти методы позволяют также прогнозировать возможные пределы горения систем по соотношению исходных компонентов тепловыделению в зависимости от состояния окружающей среды: давления, начальной температуры, доли воздуха, участвующего в процессе горения и др. Что касается металлизированных конденсированных систем (МКС), то расчет характеристик их продуктов «первичного» горения представляет собой исключительно сложную задачу, вследствие изменения химического состава газовой фазы, обусловленного горением и испарением частиц металла. Кроме этого, для расчета температуры, состава и свойств продуктов сгорания необходимы данные о свойствах индивидуальных веществ продуктов сгорания, механизме и скоростях химических реакций, которые не для всех веществ в настоящее время известны.

Поэтому термодинамические расчеты температуры, состава и свойств продуктов сгорания МКС возможны на данный момент только при ряде допущений, идеализирующих процесс горения. Тем не менее эти расчеты имеют исключительно важное значение, так как высокие температуры горения и химическая активность практически исключают возможность непосредственного измерения состава и свойств продуктов сгорания МКС.

Однако проведенные исследования [3, 8-12] для конденсированных систем металл + окислитель с добавками органических веществ (например, система магний + нитрат натрия или система магний + нитрат натрия + органическая добавка (парафин, стеарин, нафталин, антрацен и др.), температура горения которых может достигать 2000-4000 К указывают на то, что процесс их горения близок к идеальному.

В данной работе для МКС указанного типа рассматриваются разработанные приближенные методы термодинамического расчета температуры и состава продуктов сгорания, позволяющие на стадии проектирования изделий различного назначения прогнозировать возможные пределы горения МКС по соотношению компонентов (коэффициенту избытка окислителя α), которыми снаряжаются эти изделия, и тем самым предсказывать области устойчивой и стабильной работы изделий.

1 ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ РАВНОВЕСНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ И СОСТАВА ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ

Продукты сгорания МКС в общем случае представляют многокомпонентную гетерогенную смесь газов и конденсированных (жидких или твердых) веществ. Газы в продуктах сгорания частично диссоциированы и ионизованы.

Чтобы определить состав гетерогенной смеси, вообще говоря, необходимо знать механизм и кинетику всех протекающих реакций. Однако при достаточно высоких температурах, когда скорости прямой и обратной реакции велики и одинаковы, смесь практически находится в химическом равновесии, и состав ее может быть определен из термодинамического расчета.

Термодинамический расчет равновесной температуры и состава продуктов сгорания выполняется при следующих допущениях. Считается, что все газы идеальные, и их термодинамические функции не зависят от давления. Между газообразными и конденсированными компонентами существует фазовое равновесие. Подразумевается, что конденсированные

продукты не образуют между собой растворов и сплавов. Объем конденсированных веществ в продуктах сгорания пренебрежительно мал.

Исходный состав МКС обычно задается в виде условной формулы

$$\mathcal{E}_{b_1}^{(1)} \mathcal{E}_{b_2}^{(2)} \mathcal{E}_{b_3}^{(3)} \dots \mathcal{E}_{b_m}^{(m)},$$

$\mathcal{E}^{(i)}$ - символ i -го химического элемента, b_i - количество атомов i -го химического элемента в условной молекуле МКС.

В общем случае система уравнений, определяющая равновесную температуру и состав продуктов сгорания, должна включать в себя уравнения материального баланса, электронейтральности, закона действующих масс, закона Дальтона и уравнение закона сохранения энергии.

Запишем эти уравнения для гетерогенной смеси продуктов сгорания, состав которой ищем в мольных долях X_j :

$$X_j = M_j/M,$$

M_j - число молей компонента j в продуктах сгорания; M - общее число молей продуктов сгорания.

Уравнения материального баланса:

$$M \cdot \sum_i (X_i + X_{ik}) + M \cdot \sum_j a_{ij} \cdot (X_j + X_{jk}) - b_i = 0, \quad (1)$$

a_{ij} - количество атомов i -го химического элемента в одном моле вещества j ; X_i, X_{ik} - мольная доля независимого (здесь - атомарного) компонента i в газовой и конденсированной фазе продуктов сгорания соответственно; X_j, X_{jk} - мольная доля компонента j в газовой и конденсированной фазе продуктов сгорания соответственно.

Уравнение электронейтральности:

$$\sum_i a_{ei} \cdot X_i + \sum_j a_{ej} \cdot X_j = 0, \quad (2)$$

a_{ei}, a_{ej} - кратность ионизации.

Уравнение закона действующих масс:

для газообразных компонентов ξ

$$X_j = A^{-1} \cdot \sum_i^{(\sigma_i - 1)} / K_j(T) \cdot \prod_i X_i^{a_{ij}}, \quad (3)$$

для газообразных компонентов, имеющих конденсированную фазу,

$$X_i = A^{-1} \cdot P_i^{\text{насыщ.}}(T), \quad (4)$$

$$X_j = A^{-1} \cdot P_j^{\text{насыщ.}}(T), \quad (5)$$

$$A = P / \left(1 - \sum_i X_{ik} - \sum_j X_{jk} \right),$$

P - общее давление; $K_j(T)$ - константа равновесия реакции образования компонентов j из атомарных компонентов i , являющаяся функцией температуры T .

Уравнение закона Дальтона:

$$\sum_i (X_i + X_{ik}) + \sum_j (X_j + X_{jk}) - 1 = 0. \quad (6)$$

Уравнение закона сохранения энергии:

$$\sum_i [X_i \cdot I_i(T) + X_{ik} \cdot I_{ik}(T)] + \sum_j [X_j \cdot I_j(T) + X_{jk} \cdot I_{jk}(T)] - I_T = 0, \quad (7)$$

где I_T - полное теплосодержание исходной смеси при нормальной температуре; $I_i(T)$, $I_{ik}(T)$, $I_j(T)$, $I_{jk}(T)$ - полное теплосодержание соответствующего компонента в продуктах сгорания при равновесной температуре горения.

Если необходимо рассчитать параметры адиабатического процесса расширения продуктов сгорания в сопле, то к указанным уравнениям (1)-(6) добавляется еще одно уравнение, характеризующее равенство энтропии продуктов сгорания в камере и в заданном сечении сопла:

$$\sum_i [X_i \cdot S_i(T_a) + X_{ik} \cdot S_{ik}(T_a)] + \sum_j [X_j \cdot S_j(T_a) + X_{jk} \cdot S_{jk}(T_a)] - S = 0, \quad (8)$$

где S - энтропия продуктов сгорания в камере; T_a - температура в заданном сечении сопла; $S_i(T_a)$, $S_{ik}(T_a)$, $S_j(T_a)$, $S_{jk}(T_a)$ - энтропия соответствующего компонента в продуктах сгорания при температуре T_a .

Входящие в уравнения (3)-(6) величины $K(T)$, $P_{насыщ}(T)$, $I(T)$ и $S(T)$ характеризуют термодинамические свойства веществ - продуктов сгорания. В существующей справочной литературе эти величины представлены в зависимости от температуры в табличном виде. Однако при расчетах на ЭВМ удобнее пользоваться не табулированными значениями термодинамических функций, а аппроксимирующими формулами. В известных справочниках такие формулы приведены, однако они состоят из одиннадцати членов, и использование их при расчетах требует большого объема оперативной памяти ЭВМ.

Специально проведенная работа показала, что таблицы термодинамических функций могут успешно быть аппроксимированы более «короткими» полиномами вида

$$\Phi^*(T) = f_1 + f_2 \cdot \ln X + f_3 \cdot X^{-2} + f_4 \cdot X^{-1} + f_5 \cdot X + f_6 \cdot X^2 + f_7 \cdot X^3, \quad (9)$$

где $X = T \cdot 10^{-4}$. Полином этого вида оказался удобным и для аппроксимации термодинамических функций конденсированных веществ, теплоемкость которых обычно задается выражением вида

$$C_p = a + b \cdot T + c \cdot T^2.$$

Переходя от C_p к Φ^* , получим то же самое выражение (9), в котором $f_6 = f_7 = 0$. Таким образом, достигается общность вычисления термодинамических функций при расчетах на ЭВМ.

Через Φ^* , как известно, могут быть выражены все необходимые для решения системы уравнений (1)-(8) термодинамические функции:

$$\begin{aligned} R \cdot \ln k(T) &= \Delta \Phi^* - \Delta H / T, \\ R \cdot \ln P_{насыщ}(T) &= \Delta \Phi^* - \Delta H^0 / T, \\ I(T) &= \Delta H_{f_{298}} - (H_{298}^0 - H_0^0) + \frac{\partial \Phi^*}{\partial T} \cdot T^2, \\ S(T) &= \Phi^* + \frac{\partial \Phi^*}{\partial T} \cdot T. \end{aligned}$$

Здесь же отметим, что полиномы вида (9) оказались удобными и для аппроксимации интегралов столкновений $\Omega^{(1,3)}$, необходимых для расчета теплофизических свойств продуктов сгорания:

$$(\Omega^{(1,3)})^{-1} = f_1 + f_2 \cdot X^{-2} + f_3 \cdot X^{-1} + f_4 \cdot X + f_5 \cdot X^2 + f_6 \cdot X^3,$$

$$X = \ln T^* + a.$$

С математической точки зрения система уравнений (1)-(8) для определения равновесной температуры и состава продуктов сгорания представляет собой систему нелинейных алгебраических уравнений. Число уравнений в системе определяется количеством атомарных i и молекулярных j компонентов, составляющих продукты сгорания, и может достигать нескольких десятков и более. Из-за сложности и трудоемкости решение этой системы целесообразно проводить на ЭВМ. Для повышения эффективности проводимых расчетов на ПЭВМ, совместимых с IBM PC, AT, XT, использовались специализированные пакеты прикладных программ РАКЕТ1 и МЕТ3 [13, 14].

При этом разработанное программное обеспечение позволяет учитывать возможность образования газообразных и конденсированных продуктов сгорания, для которых к настоящему времени известны термодинамические и кинетические константы их образования.

2 ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ТЕМПЕРАТУРЫ И СОСТАВА ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ С УЧЕТОМ ФАЗОВОЙ НЕРАВНОВЕСНОСТИ

Как уже отмечалось, термодинамический расчет достаточно строго определяет состав продуктов высокотемпературной реакции, например, при условии, что не играет существенной роли кинетика процесса. Однако в гетерогенных системах даже в условиях высоких температур кинетическими процессами не всегда можно пренебречь. При горении МС наиболее медленными кинетическими процессами являются испарение и горение капель и частиц металлов.

Характерная особенность неравновесной гетерогенной системы - различный уровень температур у различных компонентов. Температура испаряющейся капли зависит от давления и температуры окружающей среды и всегда ниже этой температуры.

Температура горячей частицы металла также отличается от окружающей температуры. Температуру газообразных компонентов, в том числе и паров металла, и мелкодисперсных окисных и сажевых частиц (диаметром несколько микрон и менее) можно принимать одинаковыми. При заданной степени испарения и окисления металла это соответствует «эвклистационарному» составу продуктов сгорания в системе газ - мелкодисперсные конденсированные частицы. Именно это обстоятельство позволяет проводить термодинамический расчет гетерогенных систем с учетом фазовой неравновесности.

Рассмотрим в качестве примера переобогащенную горючими компонентами систему, в состав которой входит магний, углерод, водород и кислород. Содержание элементов в 1 кг исходной смеси в грамм-атомах обозначим соответственно (Mg), (C), (P) и (O). Очевидно, что магний в количестве [(Mg) - (O)] грамм-атомов останется неокисленным и будет испаряться.

Определим степень испарения магния Z соотношением

$$Z = 1 - \frac{(Mg^*)}{(Mg) - (O)}, \quad (10)$$

(Mg^{*}) - количество неиспарившегося магния в 1 кг исходной смеси. Следовательно, для заданной степени испарения магния Z можно заранее, воспользовавшись соотношением (10), установить в исходном составе количество неиспарившегося магния:

$$(Mg^*) = (1 - Z) \cdot [(Mg) - (O)]. \quad (11)$$

Этот магний рассматриваем в качестве дополнительного, пятого элемента Mg^* , отличие которого от «обычного» элемента Mg заключается лишь в том, что он искусственно «лишен» возможности испаряться, для чего приписываем ему максимально возможное значение теплоты сублимации. Понятно, что при таком условии в продуктах сгорания практически не будет паров Mg^* . Остальной Mg в количестве $[(Mg) - (O) - (Mg^*)]$ г-атомов при любом значении $Z \leq Z_{max}$ будет присутствовать в продуктах сгорания только в парообразном виде.

По аналогии со степенью испарения определим полноту окисления магния выражением

$$y = 1 - \frac{(Mg^{**})}{(O)} \quad (12)$$

где (Mg^{**}) - количество неокислившегося магния в г-атомах в 1 кг исходной смеси МКС. Для заданной полноты окисления магния это количество легко определить, пользуясь выражением (12)

$$(Mg^{**}) = (1 - y) \cdot (O).$$

Чтобы «изолировать» полученное количество (Mg^{**}) , рассматриваем магний Mg^{**} как новый, шестой, имеющий такие же свойства, что и магний Mg^* . На образование окиси магния, таким образом, остается лишь $[(O) - (Mg^{**})]$ г-атомов магния.

«Выводя» из реакционноспособных продуктов (Mg^{**}) г-атомов магния мы одновременно «освобождаем» $(O^*) = (Mg^{**})$ г-атомов кислорода, который, если не принять соответствующих «мер», прореагирует с парообразным магнием Mg . Чтобы этого не произошло, (O^*) г-атомов кислорода необходимо также «выделить» в отдельный элемент O^* , свойства которого полностью совпадают со свойствами кислорода O . Кислород O^* образует те же самые соединения, что кислород O , т.е. CO , CO_2 , H_2O , O^*H , HCO^* и др., за исключением окиси магния MgO . Понятно, что после расчета равновесного состава необходимо просуммировать мольные доли CO и CO^* , CO_2 и CO_2^* , H_2O и H_2O^* и т.д.

Итак, для расчета состава продуктов сгорания с учетом степени испарения z и полноты окисления y магния исходную смесь в 1 кг которой содержится (Mg) , (C) , (H) и (O) г-атомов соответствующих элементов, условно заменяем смесью, в 1 кг которой содержится (Mg) г-атомов магния Mg , (Mg^*) г-атомов магния Mg^* , (Mg^{**}) г-атомов магния Mg^{**} , (C) г-атомов углерода C , (H) г-атомов водорода H , (O) г-атомов кислорода O , (O^*) г-атомов кислорода O^* .

В продуктах сгорания этой условной смеси необходимо учитывать следующие компоненты:

- содержащие Mg - Mg_k , Mg , MgO_k , MgO , MgH , $MgOH$, $Mg(OH)_2$;
- содержащие Mg^* - Mg_k^* , Mg^* ;
- содержащие Mg^{**} - Mg_k^{**} , Mg^{**} ;
- содержащие C , H - C_k , C , CH , CH_2 , CH_3 , CH_4 и т.д.;
- содержащие C , O - CO , CO_2 ;
- содержащие C , O^* - CO^* , CO_2^* ;
- содержащие H , O^*H , H_2 , OH , H_2O , O_2 , O ;
- содержащие H , O^*H , H_2 , O^*H , H_2O^* , O_2^* , O^* ;
- содержащие H , C , O^*HCO , H_2CO ;
- содержащие H , C , O^*HCO^* , H_2CO^* .

Уравнение сохранения энергии и в данном случае представляет собой равенство полных теплосодержаний исходной смеси и продуктов

сгорания. При этом полное теплосодержание продуктов сгорания находим, учитывая, что температура T^* для Mg^{*k} и температура T^{**} для Mg^{**k} не равны температуре T , а являются ее функциями, а также определяются давлением и свойствами окружающей среды:

$$I_{пр.сг} = I_{равн}(T) + I_{Mg^{*k}}(T) + I_{Mg^{**k}}(T^{**}).$$

Здесь $I_{равн}(T)$ - полное теплосодержание «квазиравновесной» части продуктов сгорания при температуре T ;

$I_{Mg^{*k}}(T^*)$ - полное теплосодержание испаряющегося магния при температуре T^* , определяемой согласно теории испарения капель магния;

$I_{Mg^{**k}}(T^{**})$ - полное теплосодержание выгорающего магния при температуре T^{**} , определяемой согласно теории горения капель магния из уравнения, аналогичного (10).

Методика термодинамического расчета с учетом фазовой равновесности в основе своей содержит те же уравнения (1)-(8), что и при равновесном расчете, только вместо уравнения (7) используется уравнение (14).

3 ТЕМПЕРАТУРА И СОСТАВ ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ СИСТЕМЫ МАГНИЙ + НИТРАТ НАТРИЯ

Термодинамические расчеты равновесной температуры и состава продуктов сгорания рассматриваемой системы проводили для давлений $P=0,1-250$ кг/см² и коэффициента избытка окислителя в ней $\alpha=0,1-6,0$.

При расчетах учитывалась возможность образования только тех разнообразных и конденсированных продуктов, для которых в настоящее время известны термодинамические функции:

- газы - $O, N, Mg, N_4, O_2, O_3, N_2, NO, NO_2, N_2O, Mg_2, MgO, Na_2, NaO, Na_2O, Na_2O_2$;
- конденсаты - $Mg^k, Na^k, MgO^k, Na_2O^k$.

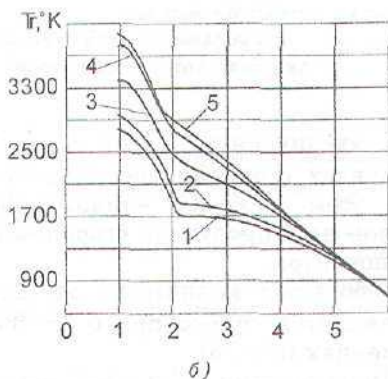
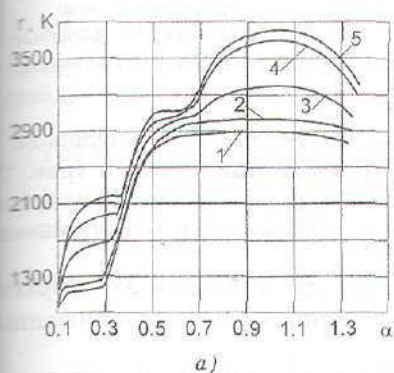


Рисунок 1 - Зависимость равновесной температуры продуктов сгорания смеси магния с нитратом натрия от коэффициента избытка окислителя при давлении $P = 0,1$ кг/см² (1), 1 кг/см² (2), 10 кг/см² (3), 100 кг/см² (4), 250 кг/см² (5):

а) кривые для соотношений $\alpha = 0,1 - 1,5$; б) кривые для соотношений $\alpha = 1,5 - 6,0$

Температура продуктов сгорания. По данным термодинамического расчета равновесная температура продуктов сгорания существенно зависит от коэффициента избытка окислителя в смеси и давления (рис. 1) и имеет максимум $(T_z)_{max}$. В интервале давлений 0,1-250 кг/см² этот максимум расположен в области $\alpha = 0,9 - 1,0$.

Изменение давления от 0,1 до 250 кг/см² (до $\alpha = 4,5$) приводит к возрастанию температуры, и $(T_2)_{max}$ соответственно увеличивается с 29 до 4020 К.

Состав продуктов сгорания. Качественный и количественный равновесный состав газообразных и конденсированных продуктов сгорания сильно зависит от коэффициента избытка окислителя α . По данным расчета в газообразных и конденсированных продуктах сгорания содержатся десятитысячные доли N , NO_2 , тысячные - Mg_2 , Na_2 , сотые - NO , NaO , Na^k , десятые - Mg , Na , O_2 , N_2 , MgO , MgO^k , Na_2O^k , Mg^k .

Появление в продуктах сгорания в заметных количествах атомарного молекулярного кислорода наблюдается лишь при $\alpha > 1,0$ (рис. 2, 3), содержание конденсированных магния и окиси натрия возможно соответственно при $\alpha = 0,10 \div 0,30$ и $\alpha > 2,0$.

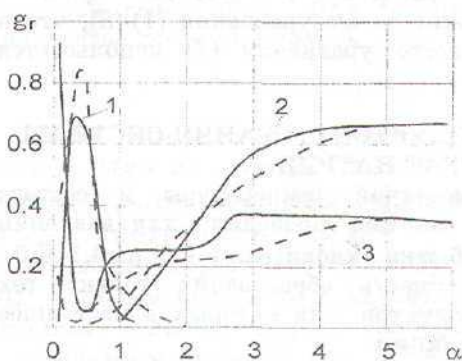


Рисунок 2 - Зависимость от α объемного содержания газообразных Mg (1), O_2 (2), N_2 (3) в продуктах сгорания смеси магния с нитратом натрия:

..... при давлении $P = 0,1$ кг/см²;
 — при давлении $P = 250$ кг/см²

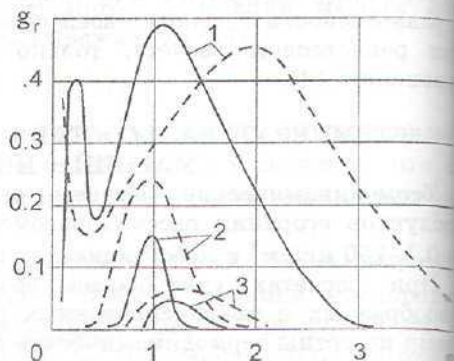


Рисунок 3 - Зависимость от α объемного содержания газообразных Na (1), MgO (2) O (3), в продуктах сгорания смеси магния с нитратом натрия:

..... при давлении $P = 0,1$ кг/см²;
 — при давлении $P = 250$ кг/см²

С увеличением α (от $\alpha = 1,0$) доля молекулярного кислорода в продуктах сгорания увеличивается до насыщения при $\alpha = 6,0$ (рис. 2). При этом характер влияния давления на содержание молекулярного кислорода в продуктах сгорания неодинаков для различных соотношений компонентов.

Небольшое количество атомарного кислорода в продуктах сгорания наблюдается только при $\alpha = 0,6-2,2$ и увеличивается при пониженных давлениях (рис. 3).

При давлении 0,1 кг/см² максимум содержания атомарного кислорода достигает при $\alpha = 1,4$, а при давлении $P = 250$ кг/см² максимум содержания атомарного кислорода наблюдается при $\alpha = 1,2$.

Содержание молекулярного азота с ростом α и давления увеличивается до насыщения при $\alpha = 6,0$ (рис. 2).

Содержание газообразного натрия в зависимости от соотношения компонентов имеет сложную зависимость с максимумами и минимумами (рис. 3).

С увеличением давления экстремальные точки сдвигаются. Так, при $P = 0,1$ кг/см² - $\alpha_{min} = 0,25$, а при $P = 250$ кг/см² - $\alpha_{min} = 0,32$ соответственно $\alpha_{max} = 1,9$ при $P = 0,1$ кг/см² и $\alpha_{max} = 1,1$ при $P = 250$ кг/см².

При соотношениях до $\alpha=2,0$ в продуктах сгорания имеется газообразный магний, зависимость содержания которого от α имеет максимум, смещающийся в сторону больших α (рис. 2).

При давлении $P=0,1 \text{ кг/см}^2$ максимум содержания газообразного магния соответствует $\alpha=0,25$, при $P = 250 \text{ кг/см}^2 - \alpha=0,35$.

Газообразная MgO в продуктах сгорания наблюдается в области $\alpha=0,35-1,9$, уменьшается с увеличением давления и имеет максимум, смещающийся в сторону больших α при увеличении давления. Содержание конденсированного магния возрастает с увеличением давления и возможно при $\alpha=0,10-0,30$ (рис.4). При этом с увеличением α содержание его в продуктах сгорания резко уменьшается.

В продуктах сгорания в значительных количествах наблюдается окись магния (рис. 4). Зависимость содержания конденсированной окиси магния имеет максимум при $\alpha = 1,0$.

При всех давлениях на восходящей ветви кривой до $\alpha=0,5$ и на нисходящей ветви кривой с $\alpha=2$ содержание окиси магния в продуктах сгорания не зависит от α . В продуктах сгорания при $\alpha=2,0$ образуется окись натрия, содержание которой зависит от давления, и увеличивается при повышении его, достигая насыщения при $\alpha = 4,5$ для всех давлений (рис. 4).

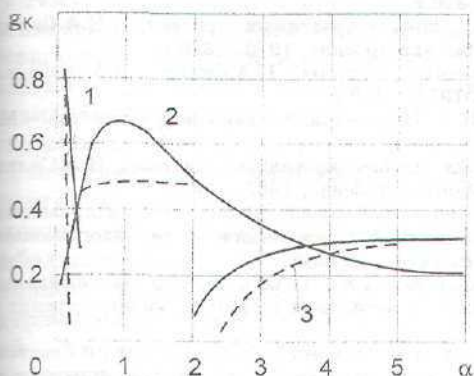


Рисунок 4 - Зависимость содержания весовой доли конденсированных $\text{Mg}^{\text{к}}$ (1), $\text{MgO}^{\text{к}}$ (2), $\text{Na}_2\text{O}^{\text{к}}$ (3) в продуктах сгорания смеси магния с нитратом натрия:

..... при давлении $P = 0,1 \text{ кг/см}^2$;
 — при давлении $P = 250 \text{ кг/см}^2$

Кроме этого, из анализа расчетных данных следует, что по составу продуктов сгорания можно выделить три характерных диапазона по α (табл. 1).

Таблица 1- Качественный состав конечных продуктов сгорания смеси магний + нитрат натрия при различных значениях α и P

Диапазон изменения α	Диапазон изменения температуры при давлениях $P=0,1-250 \text{ кг/см}^2$, К	Основной газообразный продукт сгорания	Основной конденсированный продукт сгорания
0,1-0,5	1160 - 3100	$\text{Na}, \text{N}_2, \text{Mg}$	$\text{MgO}^{\text{к}}, \text{Mg}^{\text{к}}$
0,5-2,0	2740 - 3000	$\text{Na}, \text{N}_2, \text{O}_2, \text{MgO}$	MgO
2,0-6,0	680 - 2440	$\text{Na}, \text{N}_2, \text{O}_2$	$\text{MgO}^{\text{к}}, \text{Na}_2\text{O}^{\text{к}}$

Примечание: кислород в атомарном состоянии появляется при $\alpha = 0,6 - 2,2$

SUMMARY

Approximate methods of thermodynamic temperature calculation and composition of combustion products of condensed systems metal + oxidant + organic addition were worked out.

Thermodynamic calculation for the system magnesium + sodium nitrate were carried out making it possible to predict possible limits of their combustion comparing components ($\alpha = 0,1...6,0$) for the wide diapason of ambient pressure changes ($p = 0,1...250 \text{ kg/sm}^2$).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Орлов Б.В., Мазинг Г.Ю. Термодинамические и баллистические основы проектирования ракетных двигателей на твердом топливе. - М.: Машиностроение, 1964. - 406 с.
2. Брауэр К.О. Пиротехнические устройства для космических аппаратов / Вопросы ракетной техники. Вып. 10. - 1969. - С. 47-61.
3. Захаров В.М., Клячко Л.А. К вопросу о скорости горения модельного смесового пороха // Физика горения и взрыва. - 1972. - № 1. - С. 15-26.
4. Волков Е.Б., Сырицын Т.А., Мазинг Г.Ю. Статика и динамика ракетных двигателейных установок. - М.: Машиностроение, 1978. - 320 с.
5. Металлические горючие гетерогенных конденсированных систем/ Н.А.Силин, В.А.Ващенко, Л.Я.Кашпоров и др. - М.: Машиностроение, 1976. - 320 с.
6. Окислители гетерогенных конденсированных систем/ Н.А.Силин, В.А.Ващенко, Н.И.Заринов и др. - М.: Машиностроение, 1978. - 456 с.
7. Шидловский А.А., Сидоров А.И., Силин Н.А. Пиротехника в народном хозяйстве. - М.: Машиностроение, 1978. - 231 с.
8. Горение металлизированных гетерогенных конденсированных систем/ Н.А.Силин, В.А.Ващенко, Л.Я.Кашпоров и др. - М.: Машиностроение, 1982. - 232 с.
9. Калмыков В.В., Климов В.Л. Термодинамический расчет высокометаллизированных конденсированных систем / Труды II Всесоюзной конференции по технологическому горению. - Черноголовка: ОИХФ АН СССР, 1978. - С. 49-51.
10. Кариенко В.И., Найбороденко Ю.С., Кашпоров Л.Я., Гладун В.Д. О максимальных температурах, достижимых при взаимодействии металлов с газами // Физика горения и взрыва. - 1986. - № 1. - С. 26-29.
11. Ващенко В.А. Прогнозирование оптимальных значений температуры и состава продуктов в волне горения, скорости ее распространения по многокомпонентным металлизированным системам. - М.: Деп. В ВИНТИ 18.020.94, № 25-хп 94.
12. Ващенко В.А. Проектування оптимальних технологічних режимів взаємодії хвилі горіння з металізованими конденсованими системами// Вісті АНУ. - 1995. - № 2. - С. 12-19.
13. Ващенко В.А. Комплекс программных средств для решения инженерных задач на ПЭВМ, совместимых с IBM PC, AT, XT по моделированию, оптимизации и управлению процессами взаимодействия концентрированных источников энергии с материалами. - М.: Деп. В ВИНТИ 2.03.94, № 31-хп94, 76 с.
14. Ващенко В.А. Высокотемпературные технологические процессы взаимодействия конденсированных источников энергии с материалами: Монография. - М.: Деп. в ВИНТИ 07.08.96, № 62-хп 96.

Поступила в редколлегию 7 июня 1999 г.