

УДК 629.7.018.3

ВЛИЯНИЕ ПРИМЕСЕЙ УНОСИМОГО МАТЕРИАЛА НА ЭЛЕКТРОННУЮ КОНЦЕНТРАЦИЮ ПЛАЗМЫ ВОЗДУХА

© 1996 г. Н. Н. Пилюгин, Е. Б. Рудный

Институт механики МГУ, Москва

Поступила в редакцию 07.07.95 г.

Представлены расчеты равновесного состава в системах N–O–K–Mo(W)–C–H при давлении 1 атм и температурах 1600–5600 К, характерных для условий в пограничном слое около тела при гиперзвуковом движении в атмосфере. Исследовано влияние концентраций примесей (С, Н, К, W, Мо) на концентрацию электронов в плазме воздуха. Установлено, что вплоть до температур 3000 К для молибдена и до 3500 К для вольфрама добавление металлов (0.1–5%) заметно понижает электронную концентрацию в смесях воздуха с добавками (С, Н, К). При этом содержание углерода и водорода в системе не должно превышать 5%. Эти явления могут влиять на распространение радиоволн в плазме около тела. Обсужден вопрос о моделировании уноса W и Мо при входе тела в атмосферу.

Результаты многочисленных наземных и летных испытаний свидетельствуют о том, что в течение гиперзвукового полета в плотных слоях атмосферы происходит унос материала с поверхности летательного аппарата [1]. Продукты испарения с поверхности могут влиять на распределение нейтральных и заряженных частиц около тела, которые определяют параметры около летящего тела [2, 3]. Основным параметром, влияющим на распространение радиоволн, является концентрация свободных электронов. Поэтому унос с поверхности тела веществ, обладающих отличными от воздуха ионизационными или электроотрицательными свойствами, может существенно изменять поглощение и отражение радиоволн от слоя плазмы, окружающей тело [2]. К веществам, сравнительно легко попадающим вследствие абляции в след, относятся алюминий и его окислы. Обширные теоретические исследования результатов СВЧ-измерений в следах за алюминиевыми сферами [4–6] показали, что изменение погонной концентрации электронов в следе связано с процессами, в которых участвуют ионы Al^+ , AlO^- , AlO_2^- и микрочастицы конденсированного оксида алюминия.

Решение обратных задач при использовании СВЧ-измерений концентрации электронов позволило найти скорости неравновесных процессов рекомбинации и прилипания электронов с частицами алюминиевой плазмы [5, 6].

В настоящее время для снижения уноса материала при входе в атмосферу разработана комбинированная конструкция носовой части летательного аппарата, состоящая из наружного графитового покрытия и внутреннего слоя из тугоплавких материалов [7]. Наиболее подходящими, показав-

шими наилучшие характеристики по результатам многосторонних испытаний, оказались вольфрам и молибден. Для теоретического объяснения процессов, протекающих в пограничном слое на теле и в следе при наличии уноса W и Мо и примесей углерода, водорода и калия, необходимо знать химический и ионизационный составы образующейся многокомпонентной плазмы.

В данной работе приведены вычисления равновесного состава продуктов окисления W и Мо с учетом образования конденсированных соединений. Расчеты проведены для условий баллистических экспериментов [7] в области пограничного слоя на теле и задней критической точки за телом. Полученные результаты являются исходными для исследования сложных неравновесных процессов, протекающих в дальнем следе, и представляют также самостоятельный интерес для приложений в физике низкотемпературной плазмы с участием типичных присадок, присутствующих в материале стенок.

1. Моделирование процесса уноса вольфрама и молибдена в условиях входа в плотные слои атмосферы

Результаты комплексных испытаний уноса массы покрытий, состоящих из вольфрама и молибдена, проводились в [7]. Рассмотрим кратко результаты этих исследований, необходимые для построения модели неравновесных явлений, происходящих около тела при входе в атмосферу.

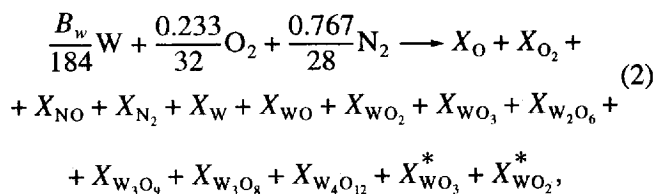
Результаты расчетов с целью оценки точности уноса сравниваются в [7] с данными различных наземных и летных испытаний. Модели уноса учитывают наличие термохимического разрушения за счет испарения и оплавления у исследу-

дуемых тугоплавких металлов. Равновесные парциальные давления химических компонентов, присутствующих в насыщенном паре, рассчитываются из закона действующих масс в предположении об известном составе конденсированной фазы. Унос массы рассчитывается на основе теории химического взаимодействия поверхности с газом в пограничном слое при допущениях равенства коэффициентов диффузии, существования термодинамического равновесия и равенства единиц чисел Прандтля и Льюиса для описания динамического и диффузионного режимов окисления и испарения тугоплавкого металла. Унос материала за счет стока расплава исходного вещества и конденсированных окисей металла оценивался из уровней теплового баланса поверхности и баланса массы в предположении, что унос расплава происходит мгновенно. Моделирование термодинамического поведения тугоплавкого металла при входе в плотные слои атмосферы включает три основных режима уноса: 1) динамически ограниченный режим образования и испарения окисной пленки; 2) образование конденсированной окиси под влиянием диффузии молекул из пограничного слоя, сопровождающееся уносом материала в форме испарения окиси и стока расплава окиси; 3) исчезновение конденсированной окиси при окислении, испарении и стоке расплава основного материала также под влиянием диффузии молекул из пограничного слоя.

Термодинамическое моделирование уноса W в диффузионно-ограниченном режиме выполнено в предположении существования равновесия и с помощью термодинамического потенциала абляции

$$B_w = \dot{m} / \rho_e U_e St, \quad (1)$$

где B_w – количество материала поверхности, требуемое для химического насыщения единицы массы свободного потока газа; St – число Стантона при вдуве; $\rho_e U_e$ – поток массы на границе пограничного слоя. С помощью (1) скорость термодинамического уноса W в воздухе определяется по кинетической схеме



где $X_{WO_3}^*$ и $X_{WO_2}^*$ означают конденсированные соединения. В уравнении (2) один грамм воздуха взаимодействует с B_w граммами вольфрама, чтобы получить указанные соединения. Молярные числа газообразных соединений X_i связаны с температурой и давлением по закону действующих масс. Систему уравнений равновесия можно решить относительно B_w и X_i , применив также законы сохранения

вещества к уравнению (2) и учитывая тот факт, что свободная энергия реагирующих веществ должна быть минимальна. В [7] представлена зависимость B_w для вольфрама от температуры T для ряда давлений. Из этой зависимости видно, что при $T > 2500$ К не существует окисей в конденсированной фазе. Унос массы в газообразном состоянии происходит за счет диффузии в пограничный слой. Унос массы в состоянии конденсированной окиси в основном происходит за счет стока расплава. Следовательно, при температурах ниже точки плавления WO_3^* (WO_2^* разлагается) ввиду отсутствия механизма уноса окисная пленка будет относительно устойчива. При давлении $p < 0.1$ МПа унос массы происходит только в газообразной форме, так как температура перехода из конденсированного в газообразное состояние ниже температуры плавления WO_3^* . При $T < 1280$ К окиси относительно устойчивы, и унос массы W не имеет существенного значения. При $T > 1280$ К унос W определяется динамикой поверхности, а скорость уноса в динамически ограниченном режиме определяется с помощью следующих соотношений:

для $1280 \text{ К} < T_w < T_{TR}$, $[p] = 0.1$ МПа

$$\dot{m}_g \left[\frac{\text{кг}}{\text{м}^2 \text{ с}} \right] = 1.985 \times 10^4 (p_{O_2})^{0.59} \exp \left[-\frac{21890}{T_w} \right], \quad (3)$$

для $T_{TR} < T_w < T_{\text{диф}}$

$$\dot{m}_g = 765.6 (p_{O_2})^{0.82} \exp \left[-\frac{12376.5}{T_w} \right], \quad (4)$$

$$T_{TR} = 47050 / [16.475 - \ln(p_{O_2})]. \quad (5)$$

Здесь p_{O_2} – парциальное давление кислорода. Рассматривая тепловой баланс к контрольному объему около поверхности в предположении, что температура поверхности T_w равна $T_{\text{пл}}$ ($T_{\text{пл}} = 3690$ К) и толщина слоя расплава бесконечно мала, для уноса массы в жидкой пленке в [7] получено

$$\begin{aligned} \dot{m}_e = \frac{\rho_e u_e St (H_r - H_{gw}) + \dot{m}_g (H_{sw} - H_{gw}) - q_{Rw} - q_c}{H_{lw} - H_{sw}}, \\ q_c = -k \frac{\partial T}{\partial x}, \end{aligned} \quad (6)$$

где q_c определяется из решения уравнения теплопроводности внутри материала; H_r – энтальпия восстановления (при 298 К); H_{gw} , H_{lw} , H_{sw} – значения энтальпии в паре, жидкой пленке, твердом теле вблизи поверхности; $q_{Rw} = \epsilon \sigma T_w^4$, $\epsilon = 0.4$. Изменение числа Стантона, вызванное поступлением газообразных продуктов реакции в пограничный слой, моделируется следующими соотношениями, учитывающими различие в молекулярном весе

Теплофизические характеристики вольфрама и молибдена

Металл	ρ , г/см ³	c_p , Дж/(г град)	λ , Вт/м К	$T_{пл}$, К	$Q_{пл}$, Дж/г	A	$H_{эф}$, кДж/г
W	19.4	0.129	181.7	3646	192.6	184	4.6
Mo	10.2	0.243	134.9	2886	290.8	96	8.4

выделяющихся веществ M_w и компонент на границе пограничного слоя M_e

$$\frac{St}{St_0} = 1 - \frac{\eta \dot{m}_g}{\rho_e u_e St_0} \quad (7)$$

Для ламинарного режима обтекания

$$\eta = 0.68 \left(\frac{M_e}{M_w} \right)^{0.4} - 0.08 \left(\frac{M_e}{M_w} \right)^{0.4} \frac{\dot{m}_g}{\rho_e u_e St_0} \quad (8)$$

Для турбулентного режима

$$\eta = 0.36 (M_e/M_w)^{0.8}, \quad (9)$$

где St_0 – число Стантона без вдува.

Окисление материала и образование окисной пленки зависит от диффузии веществ в пограничном слое и стока расплава окиси. Справедливость этого утверждения зависит от толщины окисной пленки, которая может определять скорость реакции, зависящую от диффузии кислорода через слой расплава к реагирующей поверхности W.

Унос молибдена в [7] моделируется на основе тех же предположений, что и для случая вольфрама. В расчетах используются следующие продукты реакции в воздухе: MoO , MoO_2 , MoO_3 , MoO_2^* , MoO_3^* . Ввиду неопределенности термодинамических данных MoO_2^* и сложности расчета механического уноса в [7] полагают, что MoO_2^* не имеет существенного влияния на процесс уноса молибдена и не включается поэтому в расчет.

Контур границы поверхности тела определяется рядом дискретных точек, перемещение которых происходит нормально к элементу поверхности и определяет новый профиль в конце каждого интервала вычислений. Решение уравнения теплопроводности, форма поверхности и расчеты массообмена полностью взаимосвязаны.

Экспериментальные исследования с измерением изменения формы тела и смещения его критической точки проведены в плазменных дуговых установках низкого и высокого давлений, в баллистической установке длиной 260 м и в летном испытании. Получено хорошее соответствие между рассчитанными формами моделей и измеренными в экспериментах.

Подводя итоги, приведем (см. таблицу) теплофизические свойства рассмотренных металлов при $T = 293$ К.

В таблице приведены плотность ρ , удельная теплоемкость c_p , теплопроводность λ , температура $T_{пл}$ и теплота $Q_{пл}$ плавления, атомный вес A , эффективная удельная энтальпия разрушения $H_{эф}$. Следует отметить, что в [7] рассматривался естественный вдув, а расчет концентрации заряженных частиц не проводился. В следующем разделе рассмотрены расчеты (при заданном вдуве) равновесных концентраций заряженных частиц в плазме с участием Mo и W. Расчеты приведены для типичных условий течения около тела, летящего в воздухе с гиперзвуковой скоростью.

2. Постановка задачи о расчете равновесного состава в системах N–O–K–Mo–C–H–e и N–O–K–W–C–H–e

Целью данного исследования является анализ влияния примесей молибдена и вольфрама на концентрацию электронов в слабоионизованных воздушных средах. Предполагаемая работа является продолжением исследований, результаты которых были приведены в [5]. Используется равновесная модель для расчета конечного равновесного состояния при постоянных температуре и давлении, соответствующих условиям в пограничном слое на теле [7] или в окрестности заданной критической точки [2, 5].

В качестве исследуемой модельной системы взят электронейтральный воздух (0.8 молей атомов азота и 0.2 молей атомов кислорода, электроны отсутствуют) с небольшой концентрацией атомов калия (10^{-5} моля). Роль калия сводится к моделированию щелочных металлов, испаряющихся с поверхности теплозащитного покрытия летательного аппарата. Ионизация калия при высоких температурах (его потенциал ионизации 4.3 эВ существенно меньше потенциала ионизации компонентов воздуха) приводит к появлению высокой концентрации электронов (до 10^{13} см⁻³ при 2500–3000 К), что и является причиной прерывания радиосвязи.

Изменение концентрации электронов в плазме может происходить из-за попадания в плазму вещества, образующего стабильные отрицательные ионы. Ионы, в силу значительно большей массы, чем электроны, гораздо менее подвижны и не увеличивают плазменную частоту, следовательно, не мешают радиосвязи. К таким веществам

вам относятся молибден и вольфрам, образующие стабильные отрицательные ионы MO_3^- , MO_4^- , HMO_4^- и KMO_4^- ($M = \text{Mo}, \text{W}$) [8]. В реальной ситуации в пограничный слой около летательного аппарата может попасть значительное количество воды и углекислого газа. Для моделирования этого к системе добавлены углерод и водород.

Расчеты проведены для типичного значения давления 1 атм [2] в температурном интервале 1600–5600 К. Выбор диапазона расчетных параметров подробно описан в [5]. Оценить влияние примесей молибдена и вольфрама при других условиях можно при использовании программ MO.EXE и W.EXE, которые можно получить с помощью информационной системы World-Wide-Web WWW-сервера химического факультета МГУ.

2.1. Исходные термодинамические данные. Для 92 химических соединений, которые могут образовываться из элементов N, O, K, M ($M = \text{Mo}, \text{W}$), C, N и e, термодинамические данные взяты из банка данных ИВТАН-ТЕРМО [9, 10]. Это нейтральные молекулы O, O_2 , H, H_2 , OH, HO_2 , H_2O , N, N_2 , NO, NO_2 , N_2O , NH, HNO, C, C_2 , C_3 , CO, CO_2 , C_2O , C_3O_2 , CN, NCN, CNN, CNC, CCN, C_2N_2 , NCO, HCN, HNC, HCCN, HC_3N , HC_5N , HC_7N , HC_9N , HC_{11}N , M, MO, MO_2 , MO_3 , M_2O_6 , M_3O_9 , M_4O_{12} , M_5O_{15} , K, KO, K_2O , K_2O_2 , KH, KOH, $\text{K}_2\text{O}_2\text{H}_2$, KNO_2 , KNO_3 , положительные ионы O^+ , O_2^+ , H^+ , OH^+ , H_3O^+ , N_2^+ , NO^+ , NO_2^+ , C^+ , C_2^+ , CO^+ , CO_2^+ , CH^+ , CN^+ , M^+ , K^+ , K_2O^+ , электрон e, отрицательные ионы O^- , O_2^- , H^- , OH^- , HO_2^- , NO_2^- , C^- , C_2^- , CN^- и конденсированные соединения M(s), MO_2 (s), MO_3 (s), C(s), KO_2 (s), K_2O (s), K_2O_2 (s), KOH(s), KNO_2 (s), KNO_3 (s), K_2CO_3 (s).

Для отрицательных ионов MO_3^- , MO_4^- , KMO_4^- , HMO_4^- , M_2O_6^- , M_3O_9^- , ($M = \text{Mo}, \text{W}$) и газофазных молекул K_2MO_4 , KHMO_4 , H_2MO_4 использованы термодинамические данные, рекомендованные в [8, 11–19].

Для нахождения равновесного состава существует целый ряд численных методов [20], основанных на минимизации общей энергии Гиббса системы

$$G = \sum_i n_i \mu_i$$

при постоянных температуре, давлении и элементарном составе при условии неотрицательности равновесных чисел молей n_i . В данной работе все расчеты проведены с использованием подпрограммы VCS, где реализован так называемый стехиометрический алгоритм, предложенный Villars, Cruise и Smith [20].

В рамках стехиометрического алгоритма выбирается максимальное количество линейно независимых реакций, и минимизация энергии Гиббса проводится относительно так называемых химических переменных, связанных с химическими реакциями. Необходимые химические реакции генерируются автоматически таким образом, чтобы обеспечить быструю сходимость при минимизации. Начальное приближение для равновесных чисел молей в подпрограмме VCS выбирается автоматически.

Критерием сходимости в подпрограмме VCS служит достижение равновесия в каждой химической реакции

$$\left| \sum_i v_{ij} \mu_i \right| < 5 \times 10^{-6},$$

где v_{ij} – стехиометрический коэффициент (i – номер вещества, j – номер реакции). Также гарантируется соблюдение материального баланса для каждого элемента с относительной точностью 5×10^{-8} и условия электронейтральности $\left| \sum_i n_i^+ \right| - \left| \sum_i n_i^- \right| < 5 \times 10^{-9}$.

Для достижения сходимости в данных расчетах требовалось пятнадцать – сорок итераций. Время расчета одного варианта равновесного состава составляет около минуты на ПЭВМ класса АТ с сопроцессором.

Из полученных равновесных чисел молей рассчитывались мольные доли $x_i = n_i / \sum_i n_i$, равновесные парциальные давления $p_i = x_i p$, где p – общее давление, и равновесные концентрации $c_i = p_i / RT$.

2.2. Результаты расчетов и их обсуждение. Из-за ограничения объема статьи приведены результаты типичных расчетов, основное внимание уделено изменению концентрации заряженных частиц в зависимости от примесей. На рис. 1–3 приведены результаты расчетов в системе N–O–K–Mo–C–H–e, а на рис. 4–6 – в системе N–O–K–W–C–H–e. Рис. 1 и 4 показывают зависимость концентраций заряженных частиц от количества молибдена (вольфрама) при 2600 К и 1 атм при отсутствии примесей углерода и водорода ($0.8\text{N} + 0.2\text{O} + 10^{-5}\text{K} + x\text{M}$). В обеих системах N–O–K–M–e ($M = \text{Mo}, \text{W}$) при увеличении количества примеси металла M возрастают концентрации оксидов MO_3 и MO_2 и отрицательных ионов MO_3^- и MO_2^- , что приводит к снижению концентрации электронов примерно на два порядка.

Зависимости концентраций какого-либо компонента от количества добавки можно разбить на два участка. На первом участке (до уровня примеси 0.067 моля на 0.2 моля кислорода и 0.8 моля

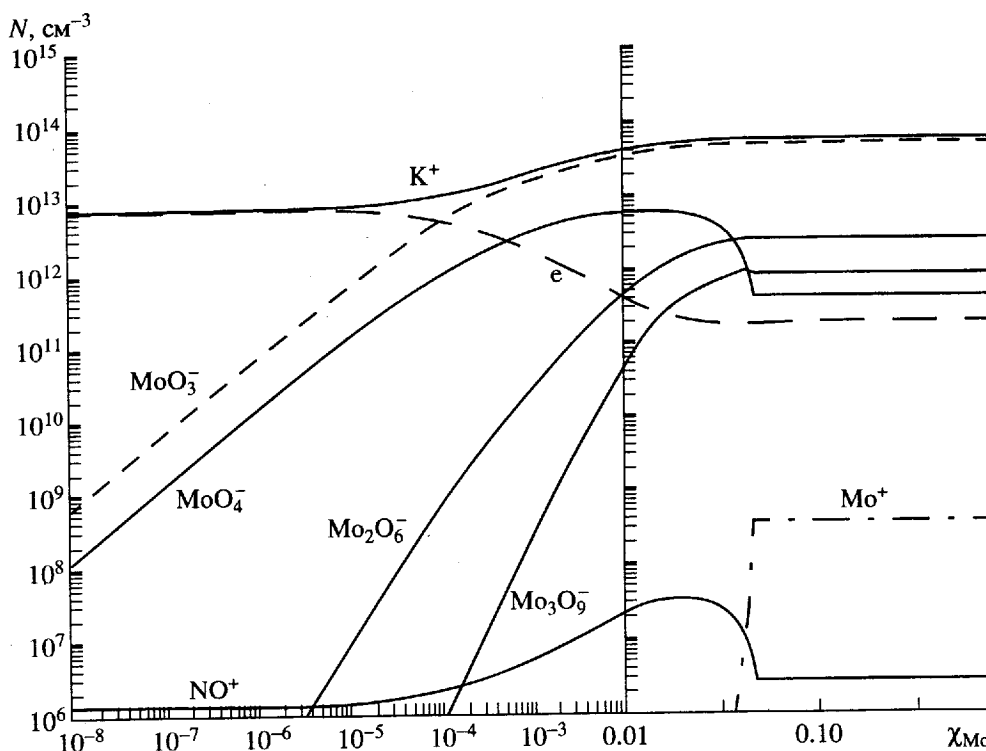


Рис. 1. Концентрации заряженных компонентов воздушной плазмы для продуктов уноса молибдена ($T = 2600 \text{ K}$, $p = 1 \text{ атм}$, начальный элементный состав $0.8\text{N} + 0.2\text{O} + 10^{-5}\text{K} + \chi_{\text{Mo}}$).

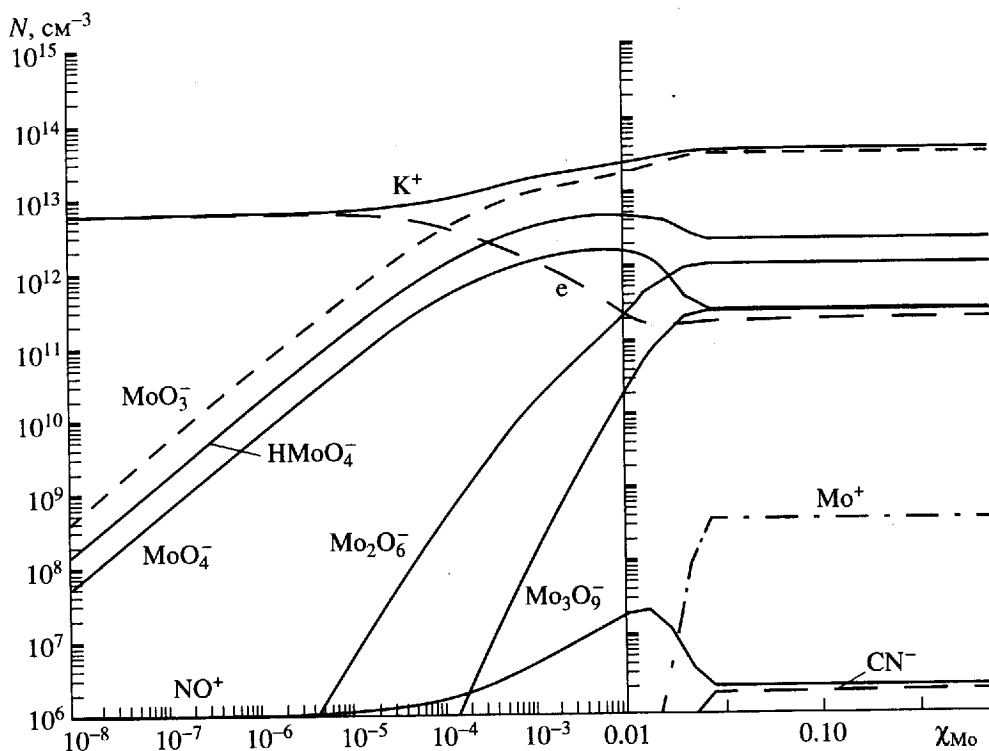


Рис. 2. Концентрации заряженных компонентов воздушной плазмы для продуктов уноса молибдена ($T = 2600 \text{ K}$, $p = 1 \text{ атм}$, начальный элементный состав $0.8\text{N} + 0.2\text{O} + 10^{-5}\text{K} + 0.05\text{C} + 0.05\text{N} + \chi_{\text{Mo}}$).

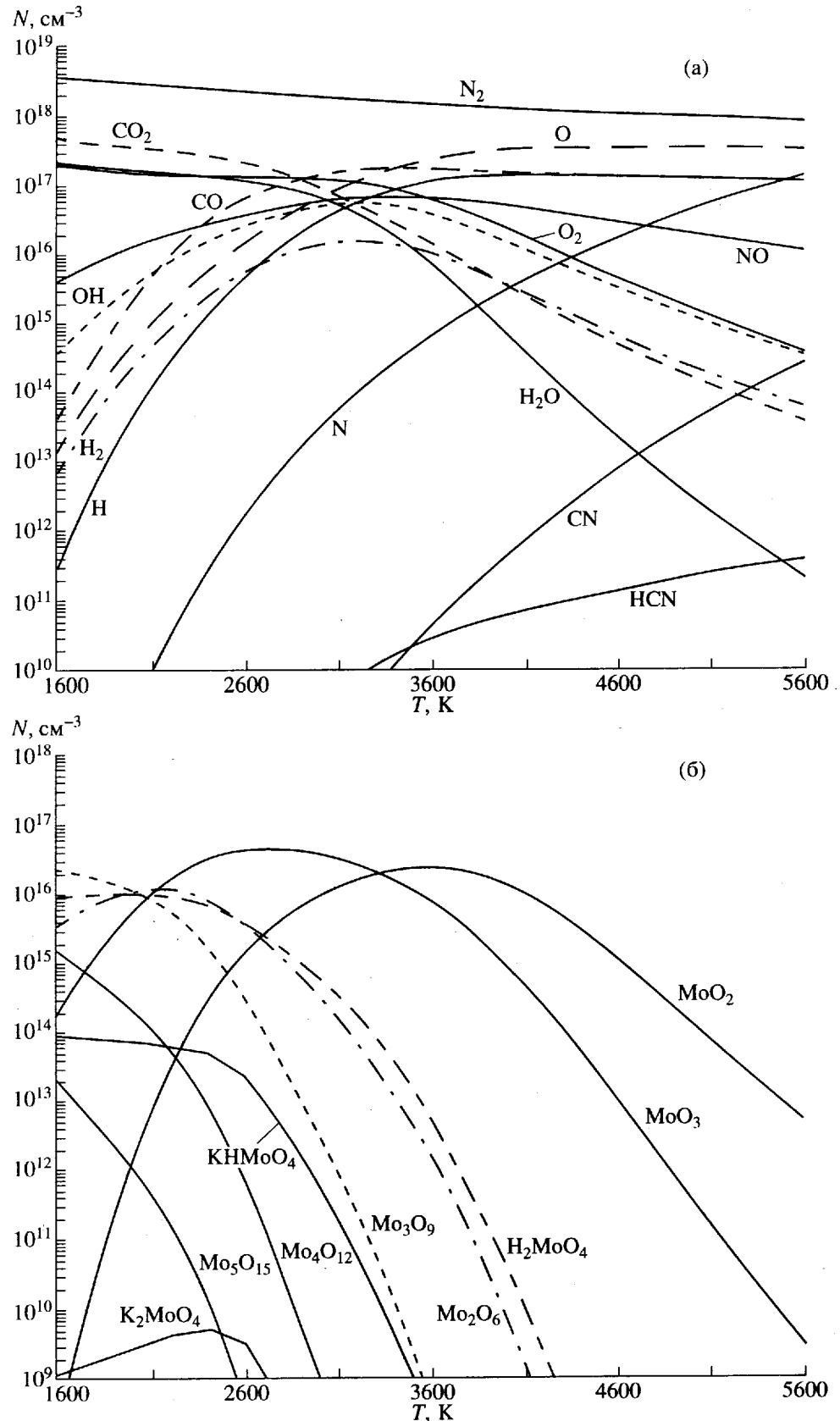


Рис. 3. Концентрации основных компонентов воздушной плазмы для продуктов уноса молибдена ($p = 1$ атм, начальный элементный состав $0.8\text{N} + 0.2\text{O} + 10^{-5}\text{K} + 0.05\text{C} + 0.05\text{H} + 0.01\text{Mo}$). а – нейтральные компоненты воздуха, б – нейтральные компоненты, содержащие молибден, в – заряженные компоненты.

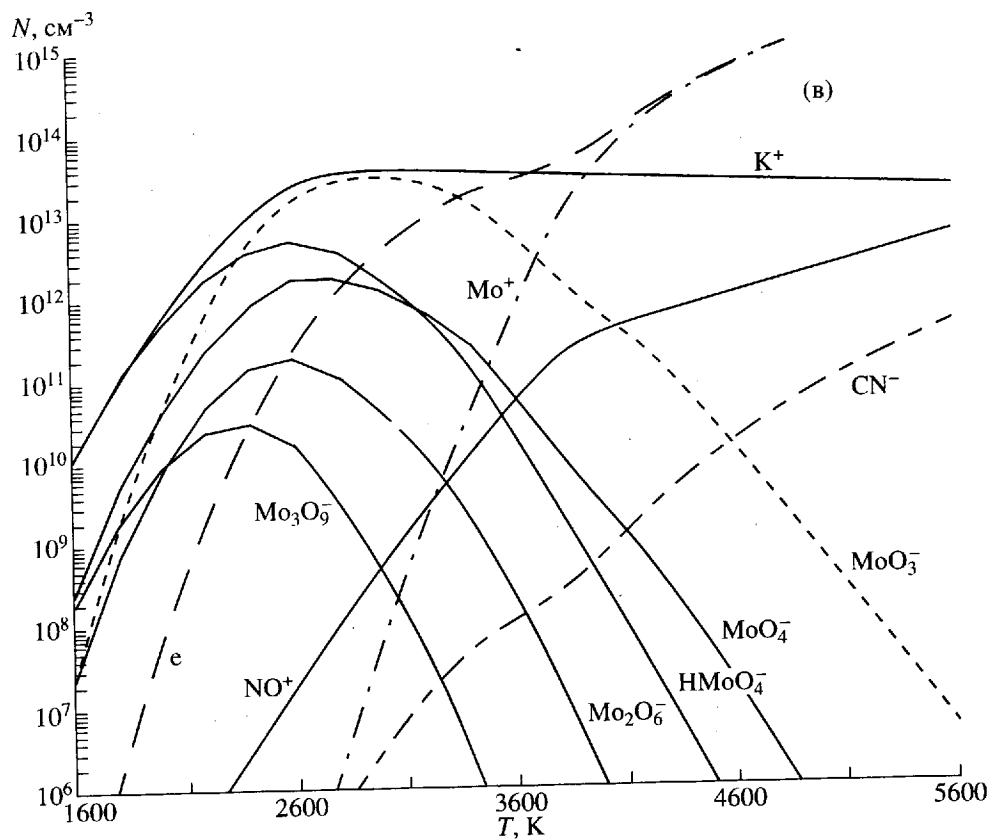


Рис. 3. Окончание.

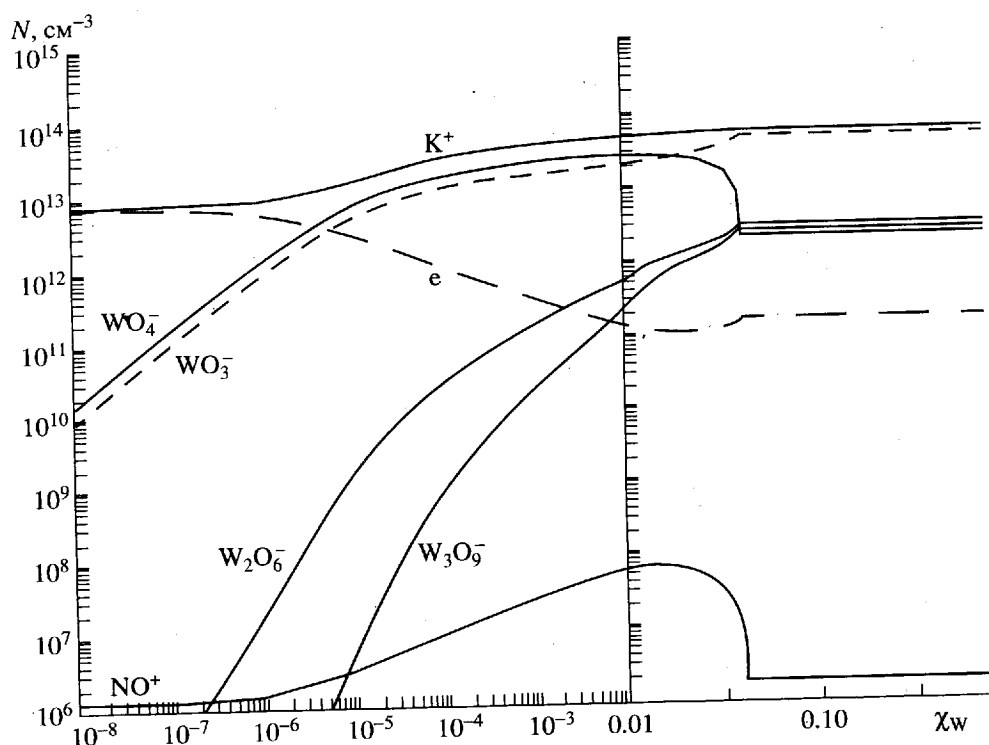


Рис. 4. Концентрации заряженных компонентов воздушной плазмы для продуктов уноса вольфрама ($T = 2600 \text{ K}$, $p = 1 \text{ атм}$, начальный элементный состав $0.8N + 0.2O + 10^{-5}K + \chi_w$).

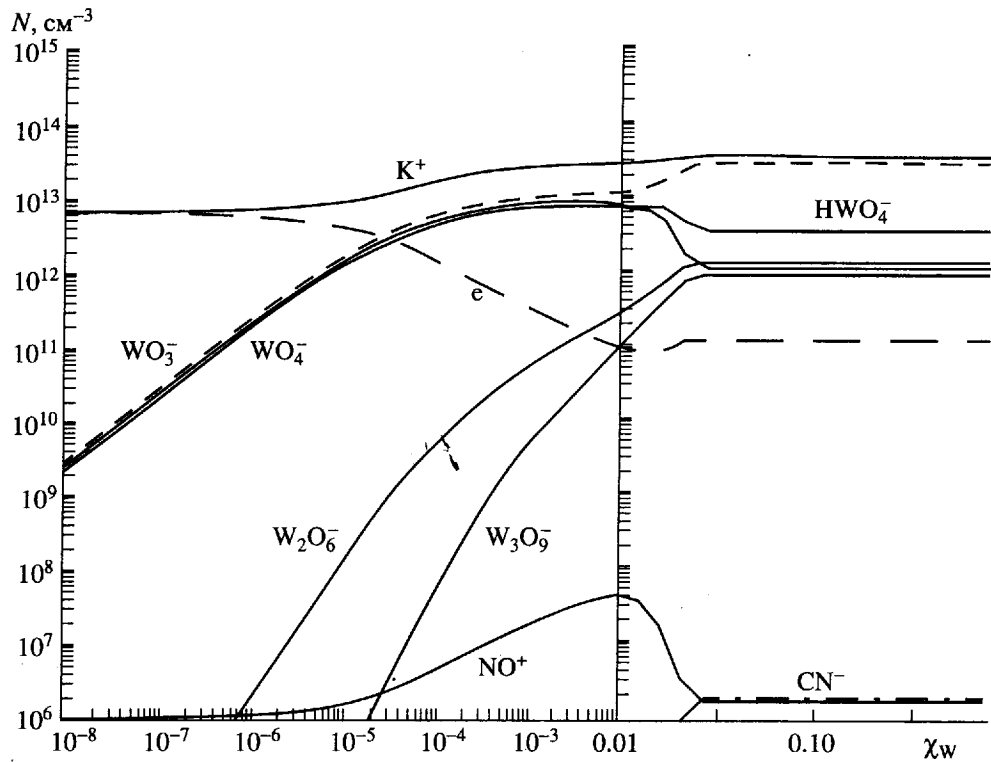


Рис. 5. Концентрации заряженных компонентов воздушной плазмы для продуктов уноса вольфрама ($T = 2600 \text{ K}$, $p = 1 \text{ атм}$, начальный элементный состав $0.8N + 0.2O + 10^{-5}K + 0.05C + 0.05H + \chi W$).

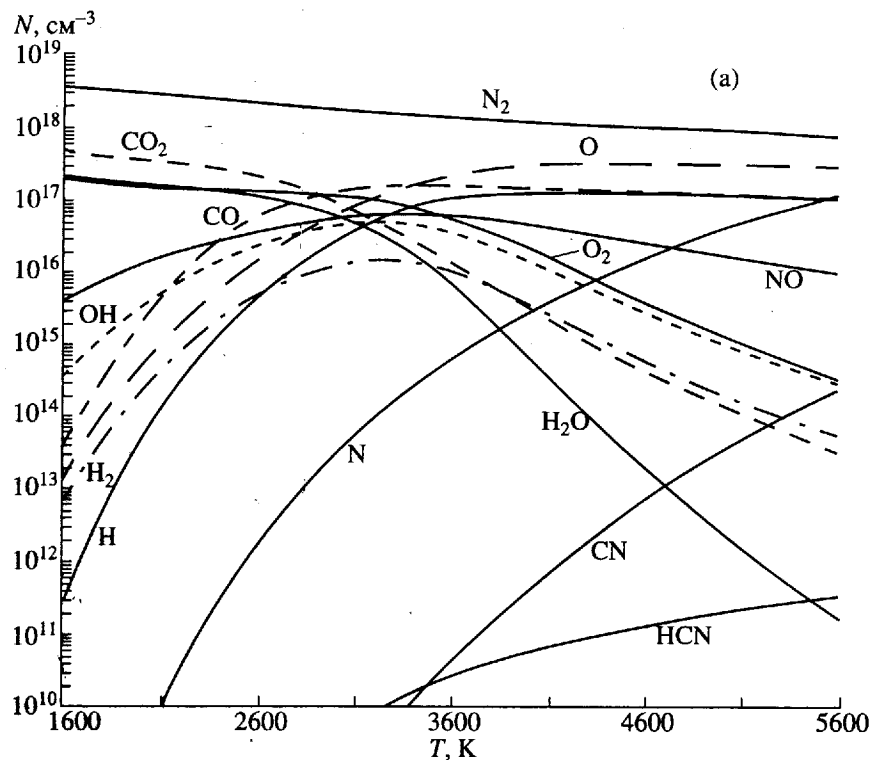


Рис. 6. Концентрации основных компонентов воздушной плазмы для продуктов уноса вольфрама ($p = 1 \text{ атм}$, начальный элементный состав $0.8N + 0.2O + 10^{-5}K + 0.05C + 0.05H + 0.01W$). а – нейтральные компоненты воздуха, б – нейтральные компоненты, содержащие молибден, в – заряженные компоненты.

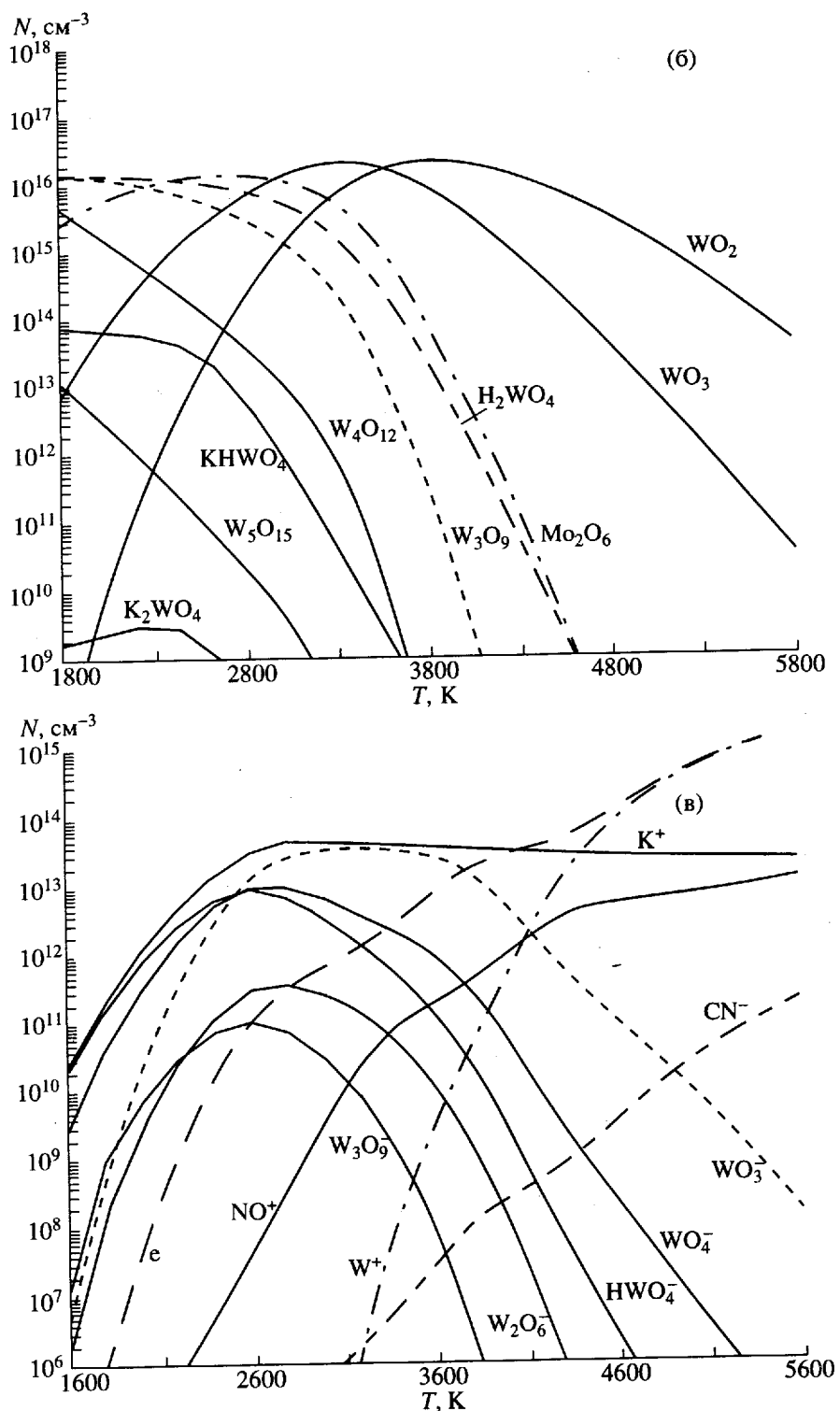


Рис. 6. Окончание.

азота) происходит линейное увеличение концентраций оксидов MO_3 и MO_2 и отрицательных ионов MO_3^- и MO_2^- , при этом концентрации компонентов воздуха меняются очень слабо. Далее происходит существенное уменьшение концентрации

кислорода, связанное с тем, что практически весь кислород связывается молибденом (вольфрамом) и на втором участке концентрации оксидов остаются постоянными. Излишек металла по сравнению с имеющимся кислородом воздуха переходит в конденсированную фазу.

Рисунки 2 и 5 аналогичны рис. 1 и 4, и отличаются тем, что в системе учтено некоторое количество углерода и водорода ($0.8N + 0.2O + 10^{-5}K + 0.05C + 0.05H + xM$, где $M = Mo, W$).

Добавление углерода и водорода вызывает образование оксидов CO , CO_2 , воды и гидроксидов OH . Это приводит к уменьшению количества свободного кислорода воздуха и вызывает смещение границы перехода между участками, описанными выше, в сторону меньших добавок металла. С другой стороны, примесь водорода приводит к образованию устойчивых кислот H_2MO_4 ($M = Mo, W$) и к появлению устойчивых отрицательных ионов MO_4^- , что вызывает небольшое дополнительное уменьшение концентрации электронов.

Рисунки 3 и 6 также относятся к системам с участием углерода и водорода ($0.8N + 0.2O + 10^{-5}K + 0.05C + 0.05H + 0.01M$, где $M = Mo, W$), но показывают температурную зависимость концентраций (a – компоненты воздуха, b – нейтральные молекулы, содержащие металл, c – заряженные частицы) при постоянном количестве примеси металла. Из рисунков видно, что наличие металлов в плазме уменьшает концентрацию электронов до температуры ≈ 3000 К. При более высоких температурах, напротив, происходит увеличение концентрации электронов по сравнению с воздухом за счет ионизации атомов металлов.

Расчеты показали, что изменение давления на порядок сравнительно слабо влияет на изменение состава плазмы. Анализ результатов расчетов показал, что до температур 3000 К в случае уноса молибдена с поверхности тела и до 3500 К в случае уноса вольфрама примеси металла в количествах 0.001–0.05 моля на 0.2 моля O_2 и 0.8 моля N_2 понижают на порядок и выше концентрацию электронов n_e в слабоионизированных воздушных средах. Присутствие углерода в количестве несколько процентов практически не влияет на понижение n_e примесями металлов. Присутствие водорода в количестве несколько процентов приводит к дальнейшему снижению n_e за счет образования устойчивых ионов MO_4^- ($M = Mo, W$). Более высокое содержание углерода и водорода приводит к снижению эффективности понижения n_e примесями металла.

Частичное финансирование данной работы осуществлялось по гранту программы “Университеты России”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Апиштейн Э.З., Пилюгин Н.Н., Турский Г.А. Унос массы и изменение формы трехмерного тела при движении по траектории в атмосфере Земли // Космические исследования. 1979. Т. 17. Вып. 2. С. 246.
2. Безменов А.Е., Алексахенко В.А. Радиофизические и газодинамические проблемы прохождения атмосферы. М.: Машиностроение, 1982. 191 с.
3. Андреев Е.П., Пилюгин Н.Н., Таганов О.К., Тихомиров С.Г. Исследование излучения газов в аэробаллистическом эксперименте. М.: Изд-во МГУ, 1988. 135 с.
4. Пилюгин Н.Н. Определение из баллистических экспериментов скоростей прилипания электронов к окислам алюминия // ТВТ. 1994. Т. 32. № 3. С. 339.
5. Пилюгин Н.Н., Рудный Е.Б. Расчет равновесного состава воздушной плазмы с продуктами уноса алюминия для условий баллистических экспериментов // ТВТ. 1994. Т. 32. № 4. С. 511.
6. Пилюгин Н.Н., Менжинский С.Ю., Пилюгин А.Н. Определение константы тройной рекомбинации электронов с ионами алюминия из баллистических экспериментов // ТВТ. 1994. Т. 32. № 5. С. 656.
7. Moody H.L., Smith D.H., Haddock R.L., Dunn S.S. Tungsten and Molybdenum Ablation Modeling for Reentry Applications // AIAA Paper. 1975. № 112. P. 1.
8. Rudnyi E.B., Vovk O.M., Kaibicheva E.A., Sidorov L.N. Formation Enthalpies of Oxygen-Containing Anions of Group VI Elements in the Gas Phase and the Electron Affinities of CrO_3^- , MoO_3^- and WO_3^- // J. Chem. Thermodynamics. 1989. V. 21. P. 247.
9. Гурвич Л.В. ИВТАНТЕРМО – автоматизированная система данных о термодинамических свойствах веществ // Вестн. АН СССР. 1983. № 3. С. 54.
10. Термодинамические свойства индивидуальных веществ. Спр. / Под ред. Глушко В.П. М.: Наука, 1978–1983 гг.
11. Jensen D.E., Miller W.J. Electron Attachment and Compound Formation in Flames. IV. Negative Ion and Compound Formation in Flames Containing Potassium and Molybdenum. 1971. Sump. (Int.) Combust., [Proc.] 13th, P. 363–370.
12. Jensen D.E., Miller W.J. Electron Attachment and Compound Formation in Flames. III. Negative Ion and Compound Formation in Flames Containing Tungsten and Potassium // J. Chem. Phys. 1970. V. 53. P. 3287.
13. Shui V.H., Singh P.I., Kivel B., Bressel E.R. Electron Attachment at High Temperatures // AIAA J. 1979. V. 17. P. 1178.
14. Walter C.W., Hertzler C.F., Devynck P. et al. Photodetachment of WO_3^- : the electron affinity of WO_3^- // J. Chem. Phys. 1991. V. 95. P. 824.
15. Walter C.W., Hertzler C.F., Devynck P. et al. Photodetachment of Molecular Negative-Ions // Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. B. 1991. V. 56-7. P. 216.
16. Center R.E. Ion-Molecule Experiments Involving Negative Ions of Tungsten and Rhenium Oxides // J. Chem. Phys. 1972. V. 56. P. 371.
17. Center R.E. Source for Negative-Ions of Refractory-Metal Oxides // Rev. Sci. Instruments. 1972. V. 43. P. 115.
18. Wang J.L.F., Margrave J.L., Franklin J.L. Low Energy Electron Attachment to Gaseous Chromium Oxides // J. Inorg. Nucl. Chem. 1975. V. 37. P. 1107.
19. Farber M., Srivastava R.D. A Mass Spectrometric Investigation of Reactions Involving Tungsten and Molybdenum with Potassium Seeded H_2/O_2 Flames // Combust. Flame. 1973. V. 20. P. 33.
20. Smith W.R., Missen R.W. Chemical Reaction. Equilibrium analysis. Theory and algorithms. N.Y.: John Wiley and sons, 1982. 364 p.