

РАСЧЕТ РАВНОВЕСНОГО СОСТАВА ВОЗДУШНОЙ ПЛАЗМЫ С ПРОДУКТАМИ  
УНОСА АЛЮМИНИЯ ДЛЯ УСЛОВИЙ БАЛЛИСТИЧЕСКИХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Н. Н. Пилюгин, Е. Б. Рудный

В работе проведены расчеты равновесного состава воздушной плазмы с продуктами уноса алюминия (с учетом образования конденсированного  $Al_2O_3$ ) для условий баллистических экспериментов в области задней критической точки за телом ( $2000\text{ К} < T < 4600\text{ К}$ ,  $60\text{ мм. рт. ст.} < p < 600\text{ мм. рт. ст.}$ ,  $10^{-4} < \chi_{Al} < 0.12$ , где  $T$  – температура,  $p$  – давление,  $\chi_{Al}$  – суммарная доля алюминия). Полученные результаты являются исходными для дальнейшего исследования сложных неравновесных процессов, протекающих в дальнем следе, а также представляют самостоятельный интерес для приложений в физике низкотемпературной плазмы с участием присадок алюминия.

РАСЧЕТ РАВНОВЕСНОГО СОСТАВА ВОЗДУШНОЙ ПЛАЗМЫ С ПРОДУКТАМИ  
УНОСА АЛЮМИНИЯ ДЛЯ УСЛОВИЙ БАЛЛИСТИЧЕСКИХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Н. Н. Пилюгин, Е. Б. Рудный

При больших гиперзвуковых скоростях полета в атмосфере становится заметным унос массы тела [1]. Продукты испарения с поверхности могут влиять на распределения нейтральных и заряженных частиц и спектральную интенсивность излучения, которые, в конечном итоге, определяют наблюдаемые параметры потока около летящего тела [2]. Таким образом, экспериментальное изучение следов за аблирующими телами представляет значительный интерес. Многие особенности физических процессов, протекающих в следах, могут быть изучены в баллистических установках при известных начальных условиях в трассе [3].

К веществам, сравнительно легко попадающим вследствие абляции в след, относится алюминий и его окислы. В лабораторных баллистических экспериментах при изучении характеристик следов за телами часто применяются модели либо из чистого дюралюминия [4-8], либо покрытые тонким слоем меди для предотвращения уноса алюминия с поверхности. В ряде случаев в момент выстрела происходит разрушение защитной пленки меди. В ряде работ экспериментально изучалось влияние уноса алюминия на излучение [4, 5] и распределение электронной концентрации в следе [6-8].

Обзор данных по измерениям спектрального излучения в следах за алюминиевыми моделями, летящими в баллистической трассе со скоростями  $v_{\infty} = 4 - 5$  км/с при давлениях  $p_{\infty} = 40$  мм. рт. ст.  $\div 1.5$  атм, выявил следующие особенности. Область свечения паров алюминия имеет протяженность до  $\approx 200$  диаметров тела и ширину 2 - 3 диаметра и

существенно зависит от давления набегающего потока. В спектре следа отмечено присутствие  $AlO$ ,  $AlO_2$ ,  $Al_2O_2$  и  $Al$ , а также частиц конденсированного оксида  $Al_2O_3$ , возникающих при сгорании алюминия.

Анализ результатов СВЧ измерений в следах за алюминиевыми сферами [6-8] показывает, что изменение линейной концентрации электронов в следе связано с процессами, в которых участвуют ионы  $Al^+$ ,  $AlO^-$ ,  $AlO_2^-$  и, возможно, заряженные микрочастицы конденсированного оксида алюминия.

Для теоретического объяснения процессов в следе при наличии уноса алюминия необходимо знать химический состав образующейся многокомпонентной плазмы. В данной работе приведены систематические вычисления равновесного состава продуктов окисления алюминия. Расчеты равновесного состава воздушной плазмы с парами алюминия (с учетом образования конденсированного  $Al_2O_3$ ) проведены для условий баллистических экспериментов [6-8] в области задней критической точки за телом. Полученные результаты являются исходными для дальнейшего исследования сложных неравновесных процессов, протекающих в дальнем следе [2, 3, 8] и также представляют самостоятельный интерес для приложений в физике низкотемпературной плазмы с участием присадок алюминия [9].

### Выбор диапазона расчетных параметров

При выборе диапазона расчетных параметров предполагалось, что для экспериментов [6-8] образование соединений алюминия протекает в области задней критической точки и при этом устанавливается химическое равновесие при заданной температуре  $T$  и давлении  $p$ . Обоснованием этому служат оценки времени нахождения частиц газа в области возвратно-циркуляционной зоны и характерного времени протекания реакций.

Область возвратно-циркуляционной зоны располагается от тела на расстояниях  $l \approx 2D$  [2], характерная скорость в этой области:  $V \approx 0.05 V_\infty$ . Тогда при  $V_\infty \approx 4$  км/с,  $D = 1$  см,  $t_{\text{Газ}} \sim 1/V \approx 10^{-4}$  с, а характерное время релаксации химических реакции в данной области  $t_x \approx 10^{-5} - 10^{-6}$  с [2, 3]. Таким образом, число Дамкелера равно  $Dam \approx t_{\text{Газ}}/t_x = 10 - 10^2 \gg 1$  и условия в окрестности задней критической точки близки к равновесным. (вставка А)

Температура  $T$ , давление  $p$  и положение задней критической точки  $x_T/D$  определялись на основе теории Чепмена-Корста по аппроксимационным формулам [2]:

$$\begin{aligned} x_T/D &= 0.1625 + 0.05625 M_\infty \\ p/p_\infty &= 1 + 0.03648 M_\infty^2 / (x_T/D) \\ T &= 10.02 M_\infty^2 + F(p) \end{aligned}$$

$$F(p) = 10^3 \cdot \{1529(p/p_0) + 3.851\} / \{1000(p/p_0) + 3.085\}$$

где  $p_0$  - давление при нормальных условиях,  $M_\infty$  - число Маха набегающего потока,  $D$  - диаметр тела. Суммарная доля алюминия в этой области тела  $\chi_{Al}$  рассчитывалась на основе парциальных давлений компонентов пара оксида  $Al_2O_3$ , определяемых из работ [10-13].

В результате определены следующие характерные диапазоны параметров для экспериментов [6-8]:  $2000 \text{ К} < T < 4600 \text{ К}$ ,  $60 \text{ мм. рт. ст.} < p < 600 \text{ мм. рт. ст.}$ ,  $10^{-4} < \chi_{Al} < 0.12$ .

Расчеты выполнены в приближении локального термодинамического равновесия. Однако, наличие в ближнем следе градиентов температуры и концентраций может вызывать диффузионные потоки элементов и нарушать их начальные балансовые соотношения. Оценить максимальную величину отклонения от исходного соотношения концентраций элементов в набегающем потоке и следе за счет диффузии можно следующим образом.

В следе за телом при скоростях  $V_\infty = 6$  км/с градиенты

температуры и концентраций меньше, чем в пограничном слое около лобовой поверхности затупленного тела, во-первых, за счет меньшего изменения самих величин (в следе изменения температуры составляют  $\Delta T \approx 3000 \div 4000$  К, в пограничном слое  $\Delta T \approx 6000 \div 7000$  К), во-вторых, за счет разных характерных толщин изменений (в следе характерные длины порядка  $d$ , в пограничном слое характерная толщина составляет  $d/\sqrt{Re} \approx 0.01 d$ , где  $d$  - диаметр тела,  $Re$  - число Рейнольдса). В [14] показано, что при сверхзвуковом неравновесном обтекании тела воздухом величина диффузионного разделения элемента кислорода зависит от концентрации атомов на внешней границе пограничного слоя и характера протекания гомогенных и гетерогенных каталитических реакций. Максимальная концентрация элемента кислорода для идеальной каталитической поверхности достигается при условиях, когда на внешней границе пограничного слоя молекулы кислорода  $O_2$  почти полностью продиссоциированы, а азот еще не начал диссоциировать, поскольку атомы кислорода диффундируют к телу быстрее молекул азота (из-за различия в массах).

Расчеты, проведенные в [14] показывают, что максимальное значение массовой концентрации химического элемента кислорода в пограничном слое равно 0.27 и достигается при значении  $C_{O_e} = 0.231$ , которое соответствует завершению диссоциации кислорода на внешней границе пограничного слоя. В [14] показано, что эти расчеты находятся в хорошем согласии с данными, полученными другими авторами.

Таким образом, диффузионное разделение элементов в пограничном слое на теле приводит к увеличению концентрации элемента кислорода не более, чем на 15%. Если использовать это максимальное значение, то балансовое соотношение элементов воздуха в следе для мольных концентраций  $N : O$  изменится от 0.8 : 0.2 до 0.77 : 0.23.

## Метод расчета

Расчет равновесного состава проведен по программе VCS [15] с использованием термодинамических данных из банка ИВТАН-ТЕРМО (версия 1986 г.) [12] и справочника [13]. Использована модель идеального ассоциированного газа. В рамках этой модели, химический потенциал компонентов плазмы описывается как

$$\mu_i = \mu_i^{\circ} + RT \ln (p_i/p^{\circ})$$

где  $\mu_i^{\circ}$  стандартный химический потенциал (молярная стандартная энергия Гиббса идеализированного состояния данного газа при стандартном давлении),  $p^{\circ} = 101325$  Па - стандартное давление,  $p_i$  - парциальное давление газа. Для конденсированного оксида алюминия считалось, что  $\mu_i = \mu_i^{\circ}$ .

В банке данных ИВТАН-ТЕРМО [12] и справочнике [13] приведены данные, из которых были рассчитаны молярные энергии Гиббса для 35 газофазных и одного конденсированного соединения, которые могут образовываться из элементов N, O, Al и электрона. Это нейтральные молекулы (O, O<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, N, N<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, NO, NO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O, N<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, N<sub>2</sub>O<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, Al, Al<sub>2</sub>, AlO, AlO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, AlN), положительные ионы, (O<sup>+</sup>, O<sub>2</sub><sup>+</sup>, N<sup>+</sup>, N<sub>2</sub><sup>+</sup>, NO<sup>+</sup>, NO<sub>2</sub><sup>+</sup>, N<sub>2</sub>O<sup>+</sup>, Al<sup>+</sup>), электрон e, отрицательные ионы (O<sup>-</sup>, O<sub>2</sub><sup>-</sup>, NO<sub>2</sub><sup>-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, AlO<sup>-</sup>, AlO<sub>2</sub><sup>-</sup>) и конденсированный оксид алюминия Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

Для нахождения равновесного состава существует целый ряд численных методов [15], основанных на минимизации общей энергии Гиббса системы

$$G = \sum_i n_i \mu_i$$

при постоянных температуре, давлении и элементном составе при условии неотрицательности равновесных чисел молей  $n_i$ . В настоящей работе все расчеты проведены с использованием подпрограммы VCS, где реализован так называемый стехиометрический алгоритм, предложенный

Villars, Cruise и Smith [15]. Наш опыт работы показал, что данная подпрограмма является одной из самых эффективных при расчете равновесного состава воздушных плазм.

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 и 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

$$| \sum_i \nu_{ij} \mu_i | < 5 \cdot 10^{-6}$$

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

Для достижения сходимости в наших расчетах требовалось пятнадцать - тридцать итераций. Время расчета одного варианта равновесного состава составляло менее одной минуты на ПЭВМ класса АТ без сопроцессора.

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  $N_i = p_i / RT$ . Для конденсированного оксида алюминия из равновесного числа молей рассчитывалась концентрация микрочастиц в единице объема, в предположении, что радиус  $r$  одной микрочастицы задан

$$N_{Al_2O_3(s)} = \frac{n \cdot M}{4/3 \cdot \pi r^3 \rho} \cdot \frac{p}{\sum_i n_i \cdot RT}$$

где  $M$  – молекулярная масса. В расчетах, согласно измерениям [2] принято, что  $r = 0.035$  мкм.

### Результаты расчетов и их обсуждение

Некоторые результаты расчетов равновесного состава при параметрах, типичных для экспериментов [6–8], приведены на рис. 1 – 6. На рис. 1 – 4 показаны зависимости объемных концентраций основных компонентов плазмы от температуры при фиксированном давлении (60 мм. рт. ст. – рис. 1, 2; 300 мм. рт. ст. – рис. 3, 4) и начальном элементном составе в мольных долях (0.8 N + 0.2 O + 0.1 Al – рис. 1, 3; 0.8 N + 0.2 O + 0.001 Al – рис. 2, 4). Рис. 5 и 6 показывают зависимости алюмосодержащих компонентов от содержания алюминия в воздухе при постоянной температуре (2500 К – рис. 5, 3000 К – рис. 6) и постоянном давлении 300 мм. рт. ст.

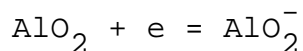
Из рисунков 1 – 4 следует, что концентрация отрицательных ионов в зависимости от температуры имеет максимум в окрестности температуры 3500 К. Концентрация микрочастиц конденсированного оксида алюминия при температурах 2000 – 3000 К сильно зависит от общего количества унесенного алюминия. Отметим, что расчетные значения при  $p = 300$  мм. рт. ст и  $\chi_{Al} = 0.1$  составляет  $N_{Al_2O_3(s)} \approx 10^{11} \text{ см}^{-3}$ , что хорошо согласуется с данными, полученными из баллистических экспериментов [8]. Сравнение рис. 1 и 3, а также 2 и 4 показывает, что изменение давления в указанных диапазонах сравнительно слабо влияет на изменение состава плазмы.

В поведении концентраций компонентов плазмы от количества унесенного алюминия (см. рис. 5 и 6) можно выделить три участка. При малом общем количестве алюминия конденсированный оксид алюминия не образуется и концентрации алюмосодержащих компонентов линейно зависят от количества унесенного алюминия. Далее начинается область



образования конденсированного оксида и концентрации газофазных компонентов выходят на плато. При дальнейшем увеличении общего содержания алюминия происходит резкое изменение всех концентраций. Критическая точка соответствует стехиометрическому соотношению  $Al : O = 3 : 2$ . Ниже нее существует конденсированный оксид в избытке кислорода (практически весь алюминий в виде конденсированного оксида), а выше – конденсированный оксид с избытком газофазного алюминия (практически весь кислород перешел в конденсированный оксид). Если для учета эффекта диффузионного разделения элементов отношение начальных мольных долей азота и кислорода изменить с  $0.8 : 0.2$  до  $0.77 : 0.23$ , то это приведет лишь к небольшому смещению критической стехиометрической точки вправо из-за повышения доли элемента кислорода в системе.

Обсудим влияние уноса алюминия на концентрацию электронов. Добавка алюминия в поток воздуха дает два противоположных эффекта. Во-первых, происходит образование оксидов  $AlO$  и  $AlO_2$ , которые захватывают электрон



с образованием стабильных отрицательных ионов  $AlO^-$  и  $AlO_2^-$ . Обратим внимание, что концентрация этих отрицательных ионов в равновесных условиях больше, чем концентрация ионов  $O^-$ ,  $O_2^-$ ,  $NO_3^-$ . Во-вторых, происходит образование атомарного алюминия, который имеет сравнительно низкий потенциал ионизации и приводит в результате реакции



к увеличению концентрации электронов в потоке.

Выполненные расчеты показывают, что в условиях термодинамического равновесия процесс, связанный с ионизацией алюминия, преобладает. Оксиды алюминия обладают недостаточной термодинамической

стабильностью и почти полностью диссоциируют при температурах выше 3500 К. В то же время при более низких температурах (2000 – 3000 К) не удастся создать большую концентрацию газофазных оксидов алюминия, достаточную для понижения концентрации электронов, из-за образования конденсированного оксида  $Al_2O_3$  (практически весь добавленный алюминий переходит в этот оксид). Отметим, что в работе [16] при изучении ионного состава метаново-кислородных пламен концентрация отрицательных ионов  $AlO_2^-$  оказалась ниже предела чувствительности измерений.

Таким образом, оксиды алюминия в газовой фазе могут способствовать понижению концентрации электронов, если благодаря неравновесным условиям будет замедлен распад газофазных оксидов алюминия до атомов алюминия и их конденсация с образованием  $Al_2O_3$ .

В заключение отметим, что достоверность полученных расчетов основана на достоверности использованных мольных энергий Гиббса. Анализ имеющихся литературных данных [11-13, 17, 18] показал, что термодинамические свойства всех соединений алюминия, за исключением молекулы  $AlO_2$ , достаточно надежны. Так, согласно данным двух фундаментальных справочников [17] (1978 год) и [13] (1980 год) энергии Гиббса образования хорошо согласуются между собой – при 2000 К они составляют: Al (81.9 и 85.4 кДж/моль), AlO (-73.7 и -75.2 кДж/моль),  $AlO^-$  (313.1 и 314.9 кДж/моль),  $Al_2O$  (-269.8 и 282.2 кДж/моль),  $Al_2O_2$  (-410.3 и -386.0 кДж/моль). Наибольшая разница здесь наблюдается для молекулы  $Al_2O_2$ , она приводит к разнице в константе равновесия с ее участием в 2.3 раза при 3500 К. Однако, как можно заметить из рис. 1-4, молекула  $Al_2O_2$  не является основным компонентом исследуемой системы и такая разница не приводит к изменениям в концентрациях остальных соединений.

Гораздо большая разница наблюдается для молекулы  $\text{AlO}_2$  ( $\Delta_f G_{2000}^{\circ} = -190.6$  [17] и  $-99.2$  кДж/моль [13]) – разница в константе равновесия при 3500 К составляет 23 раза. Данные справочника [17] основаны на работе [19], в то время как в справочнике [13] результаты данной работы сочтены ошибочными. Критическое обсуждение экспериментальных данных об энергии Гиббса  $\text{AlO}_2$  также можно найти в [11–13, 17, 18, 20 – 22]. Как следствие разного выбора энергии Гиббса для молекулы  $\text{AlO}_2$ , термодимические справочники [13б 17] дают отличающиеся значения энергии Гиббса образования иона  $\text{AlO}_2^-$  ( $\Delta_f G_{2000}^{\circ} = -472.6$  [17] и  $-376.0$  кДж/моль [13]), хотя данные по сродству к электрону  $\text{AlO}_2$  в обоих справочниках очень близки между собой.

В наших расчетах использовано значение энтальпии образования  $\text{AlO}_2$  из справочника [13]. Это означает, что в расчетах молекула  $\text{AlO}_2$  считалась более неустойчивой по сравнению с данными работы [19]. Для проверки того, как это может сказаться на полученных результатах, выполнено несколько расчетов с энергией Гиббса молекулы  $\text{AlO}_2$  и иона  $\text{AlO}_2^-$  из справочника [17]. Основное отличие по сравнению с рис. 1–4 получено для концентраций  $\text{AlO}_2$  и  $\text{AlO}_2^-$  – они возрасли (примерно в 23 раза при 3500 К). Однако, это мало отразилось на концентрации остальных компонентов. Так, равновесная концентрацию электронов изменилась не более чем на 15%.

### Благодарности

Частичное финансирование данной работы осуществлено Российским Фондом фундаментальных исследований (проект 93–03–5650) и Международным научным фондом (ISF – short-term grant).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Апштейн Э.З., Пилюгин Н.Н., Тирский Г.А. // Ж. Космич. Исслед., 1979, т. 17, вып. 2, с. 246-255.
2. Безменов А.Е., Алексащенко В.А. Радифизические 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. Москов. ун-та, 1988, 135 с.
4. Мишин Г.И., Серов Ю.Л., Явор И.П. // В сб. "Физико-газодинамические баллистические исследования", Л., Наука, 1980, с. 139-149.
5. Mach H. // Raumfahrtforschung, 1974, b. 18, N 1, p. 1-9.
6. Карнеги В.М. // РТК, 1965, т. 3, N 10, с. 37-42.
7. Langan W.T., Cresswell I.D., Browne W.G. // AIAA J., 1965, v. 3, N 12, p. 2211-2218.
8. Пилюгин Н.Н. // ТВТ, 1994 (в печати).
9. Гришин Ю.М., Тлатов А.Г. // I Всесоюзный симпозиум по радиационной плазмодинамике. Тезисы докладов, ч. I, М., Энергоэтомиздат, 1989, с. 107-112.
10. Бронштэн В.А. Физика метеорных явлений. М., Наука, 1981, 415 с.
11. Lamoreaux R.H., Hildenbrand D.L. // J. Phys. Chem. Ref. Data, 1987, v. 16, N 3, p. 419-443.
12. Гурвич Л.В. // Вестн. АН СССР, 1983. N 3. с. 54-65.
13. Термодинамические свойства индивидуальных веществ. Справочник в 4-х томах. Отв. ред. В.П.Глушко, М., Наука, 1978-1983 гг.
14. Ковалев В.Л., Суслов О.Н. // Изв. АН СССР, МЖГ, 1988, N 4, с. 115-121.

15. Smith W.R., Missen R.W. Chemical reaction. Equilibrium analysis. Theory and algorithms. 1982, John Wiley & Sons, NY, 364 pp.
16. Crovisier P.N., Horton J.H., Hassanali C.S., Goodings J.M. // Can. J. Chem., 1992, v. 70, N 3, p. 839-848.
17. JANAF Thermochemical Tables, 1978 Supplement. // J. Phys. Chem. Ref. Data, 1978, v. 7, N 3, p. 793-940.
18. Srivastava R.D., Farber M. // Chem. Rev. 1978, v. 78, p. 627-638.
19. Farber M., Srivastava R.D., Uy O.M. J. Chem. Phys. 1971, v. 55, p. 4142.
20. Kashireninov O.E., Chervonnyi A.D., Piven V.A. // High Temp. Sci., 1982, v. 15, N 2/3, p. 79-91.
21. Dhima A., Stata B., Allibert M. //High Temp. Sci., 1986, v. 21, N 3, p. 143-159.
22. Nemukhin A.V., Almløf J. // J. Mol. Struct., 1992, v. 253, p. 101-107.

## ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

- Рис. 1. Концентрации основных компонентов воздушной плазмы с продуктами уноса алюминия ( $p = 60$  мм. рт. ст., начальный элементный состав  $0.8 \text{ N} + 0.2 \text{ O} + 0.1 \text{ Al}$ ). а – нейтральные компоненты, б – заряженные компоненты.
- Рис. 2. Концентрации основных компонентов воздушной плазмы с продуктами уноса алюминия ( $p = 60$  мм. рт. ст., начальный элементный состав  $0.8 \text{ N} + 0.2 \text{ O} + 0.001 \text{ Al}$ ). а – нейтральные компоненты, б – заряженные компоненты.
- Рис. 3. Концентрации основных компонентов воздушной плазмы с продуктами уноса алюминия ( $p = 300$  мм. рт. ст., начальный элементный состав  $0.8 \text{ N} + 0.2 \text{ O} + 0.1 \text{ Al}$ ). а – нейтральные компоненты, б – заряженные компоненты.
- Рис. 4. Концентрации основных компонентов воздушной плазмы с продуктами уноса алюминия ( $p = 300$  мм. рт. ст., начальный элементный состав  $0.8 \text{ N} + 0.2 \text{ O} + 0.001 \text{ Al}$ ). а – нейтральные компоненты, б – заряженные компоненты.
- Рис. 5. Концентрации основных алюмосодержащих компонентов воздушной плазмы с продуктами уноса алюминия ( $T = 2500 \text{ K}$ ,  $p = 300$  мм. рт. ст., начальный элементный состав  $0.8 \text{ N} + 0.2 \text{ O} + \chi \text{ Al}$ ).
- Рис. 6. Концентрации основных алюмосодержащих компонентов воздушной плазмы с продуктами уноса алюминия ( $T = 3000 \text{ K}$ ,  $p = 300$  мм. рт. ст., начальный элементный состав  $0.8 \text{ N} + 0.2 \text{ O} + \chi \text{ Al}$ ).

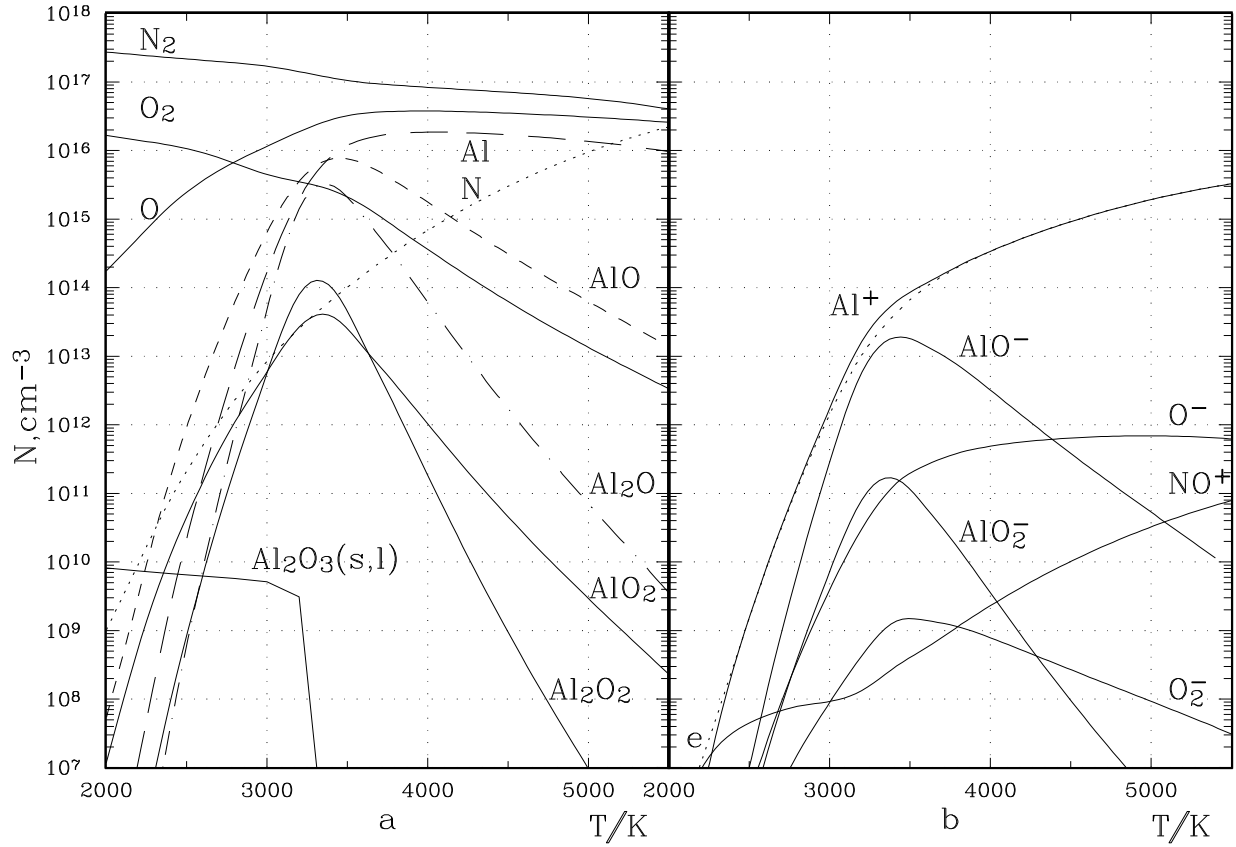


Рис. 1

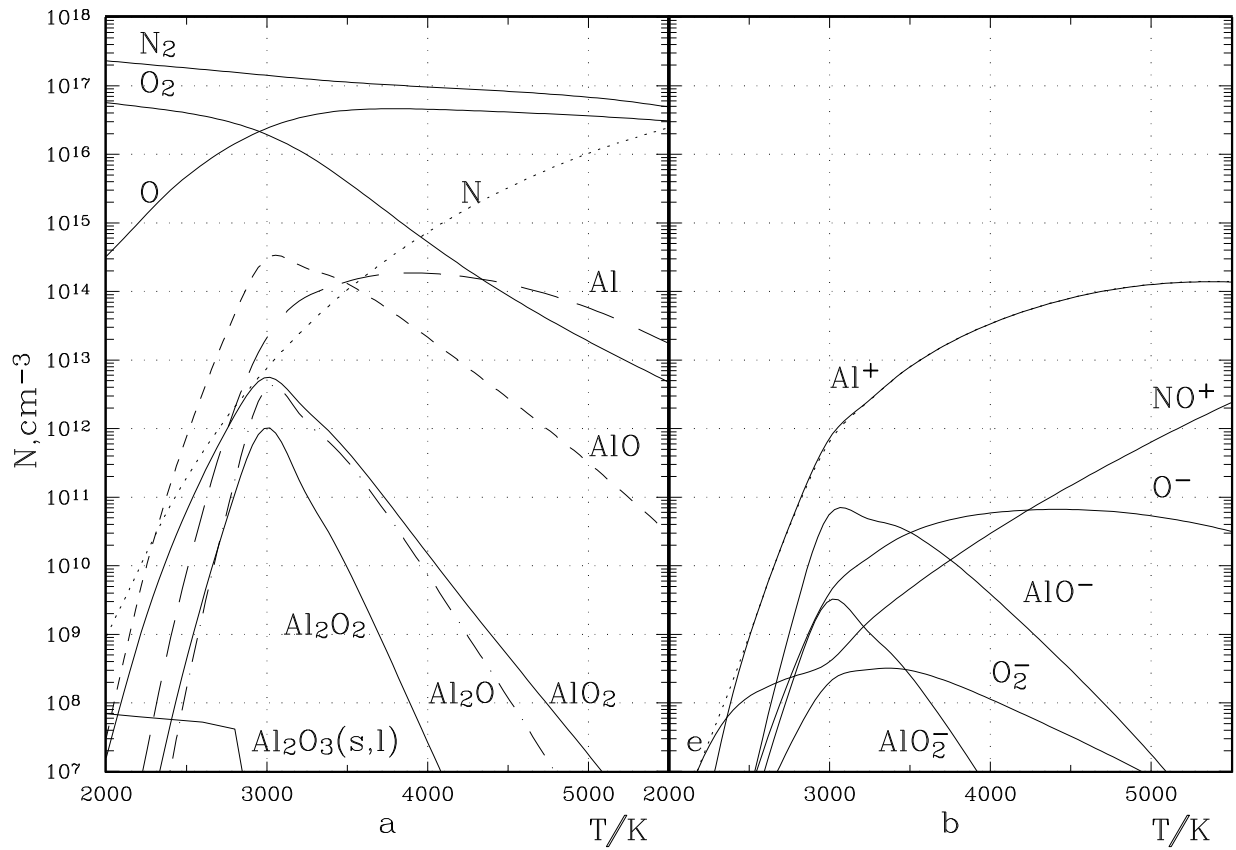


Рис. 2

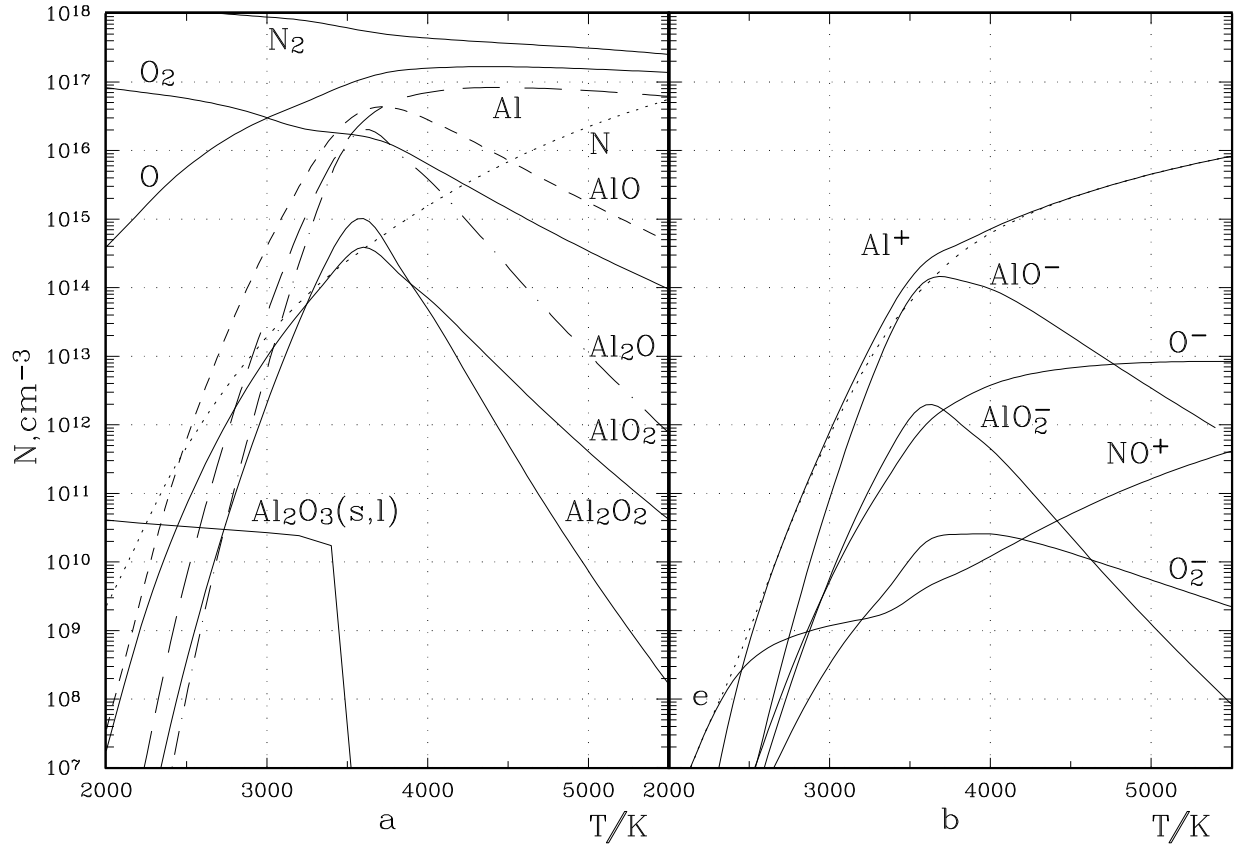


Рис. 3

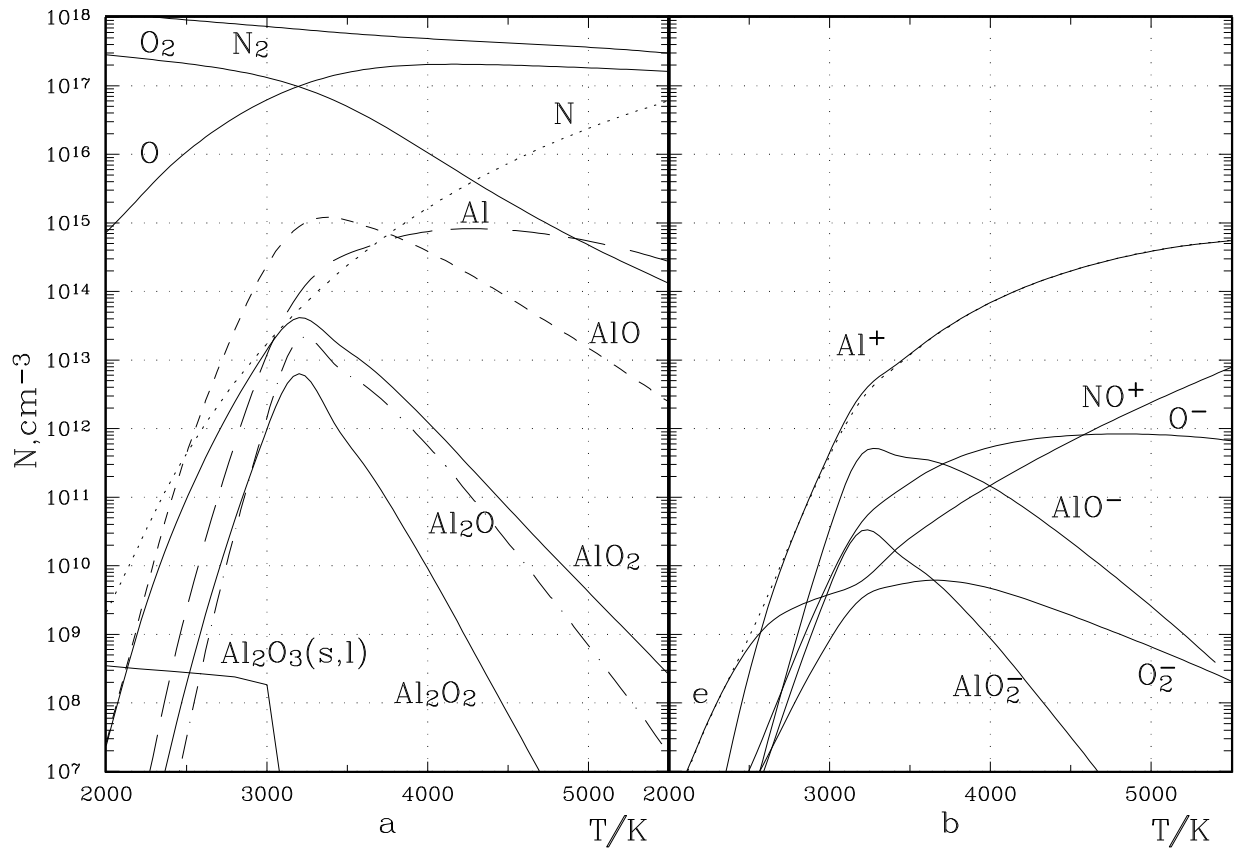


Рис. 4



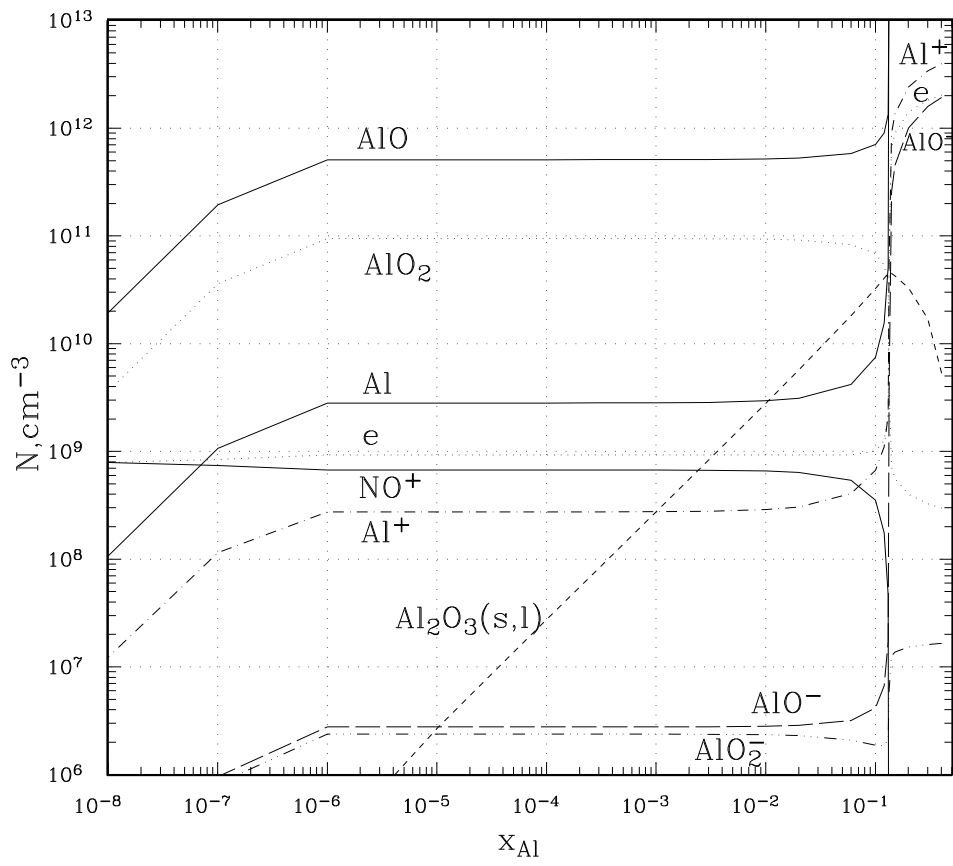


Рис. 5

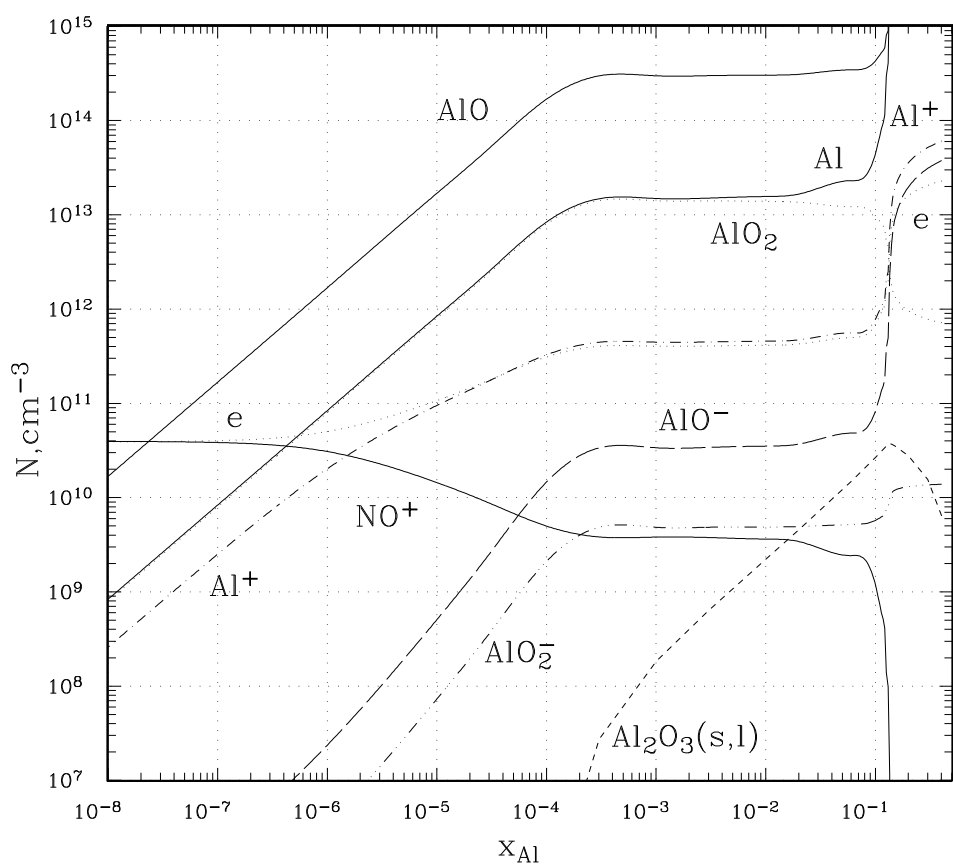


Рис. 6