

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НЕИДЕАЛЬНОЙ ПЛАЗМЫ ВОДОРОДА И АЛЮМИНИЯ



НИИ
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ
И ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ
ФИЗИКИ

*М.Т. Габдуллин,
Т.С. Рамазанов,
К.Н. Джумагулова*



КАЗАХСКИЙ
НАЦИОНАЛЬНЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ АЛЬ-ФАРАБИ

Москва, 2008



Цель работы: Рассчитать состав и исследовать термодинамические свойства неидеальной плазмы (водорода и алюминия) на основе псевдопотенциальных моделей взаимодействия.

Задачи:

- Используя интегральное уравнение Орнштейна-Цернике, проанализировать радиальные функции распределения (РФР) для частично ионизованной водородной плазмы;
- Исследовать термодинамические свойства частично ионизованной водородной плазмы (давление, внутреннюю энергию).
- Вычислить с помощью системы уравнений Саха состав частично ионизованной плазмы алюминия.
- Исследовать термодинамические свойства алюминиевой плазмы.



Параметры плазмы:

Концентрация плазмы: $n = n_e + \sum_{i=1}^k n_i + n_a = 10^{18} \div 10^{23} \text{ cm}^{-3};$

Температура плазмы: $10^4 \div 10^6 \text{ K}$

Безразмерные параметры:

Параметр связи: $\Gamma = \frac{(Ze)^2}{ak_B T}$

где $a = \sqrt[3]{3/4\pi n}$ - среднее расстояние между частицами.

Параметр плотности: $r_S = \frac{a}{a_B}$

где $a_B = \hbar^2 / e^2 m_e$ - радиус Бора.



Эффективные потенциалы взаимодействия частиц плазмы

Для взаимодействия «заряд-заряд» *a)*:

$$\Phi_{\alpha\beta}(r) = \frac{Z_{\alpha} Z_{\beta} e^2}{\sqrt{1 - 4\lambda_{\alpha\beta}^2 / r_D^2}} \left(\frac{e^{-Ar}}{r} - \frac{e^{-Br}}{r} \right)$$

где

$$A^2 = \frac{1 - \sqrt{1 - 4\lambda_{\alpha\beta}^2 / r_D^2}}{2\lambda_{\alpha\beta}^2}, \quad B^2 = \frac{1 + \sqrt{1 - 4\lambda_{\alpha\beta}^2 / r_D^2}}{2\lambda_{\alpha\beta}^2}.$$

Поляризационный потенциал для взаимодействия «заряд-атом» *b)*:

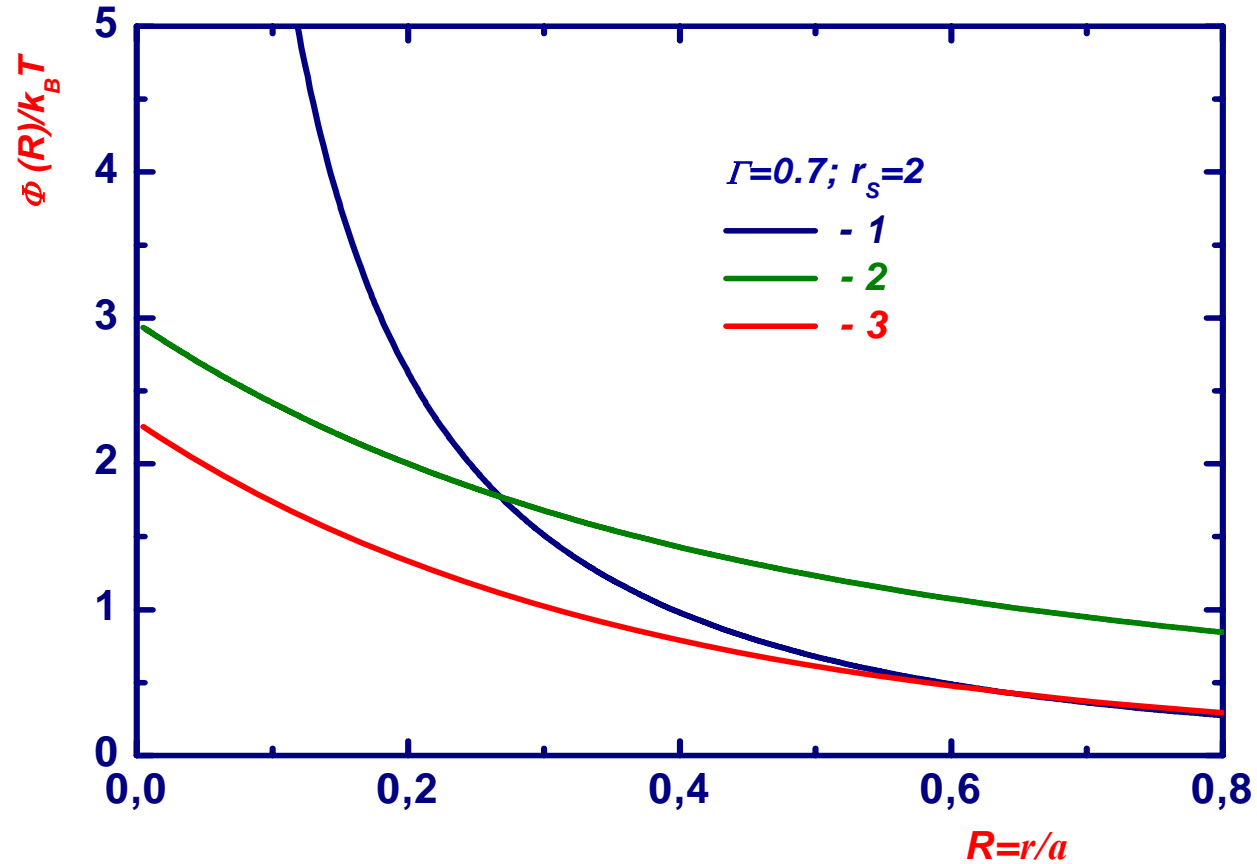
$$\Phi_{ea}(r) = -\frac{e^2 \alpha}{2r^4 (1 - 4\lambda^2 / r_D^2)} \left(e^{-Br} (1 + Br) - e^{-Ar} (1 + Ar) \right)^2$$

a) Ramazanov T.S., Dzhumagulova K.N., Phys. Plasmas **9**, 3758 (2002)

b) T.S. Ramazanov, K.N. Dzhumagulova, Yu.A. Omarbakiyeva Phys. Plasmas **12** №8 092702 (2005).



Эффективные потенциалы взаимодействия для заряд-заряд



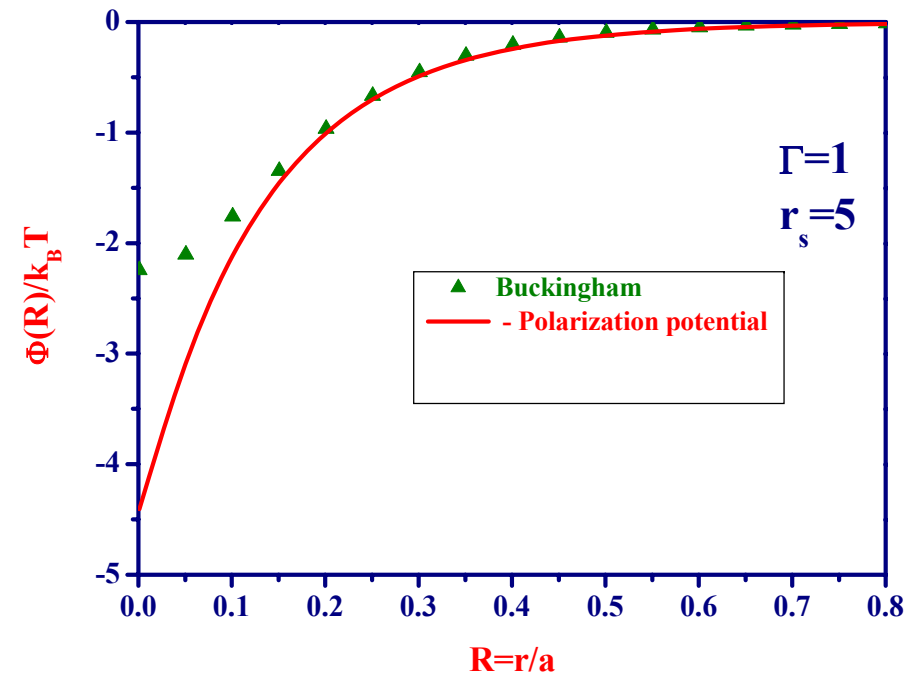
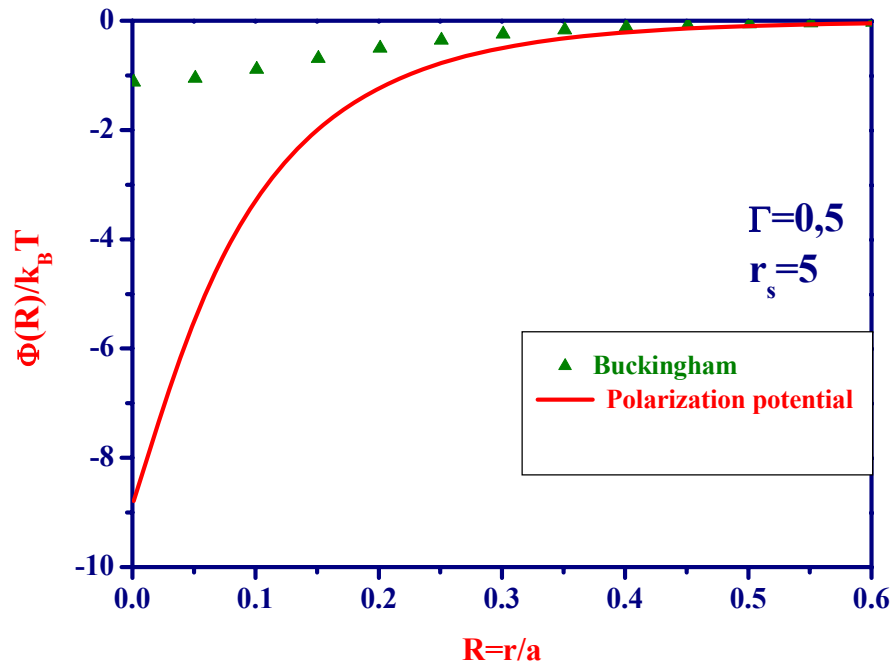
1 – потенциал Дебая;

2 – потенциал Дойча;

3 – (Ramazanov T.S., Dzhumagulova K.N., *Phys. Plasmas* 9, 3758 (2002))



Эффективные потенциалы заряд-атомного взаимодействия



$$\Phi_{ea}(r) = -\frac{e^2 \alpha}{2(r^2 + r_1^2)^2} e^{-2r/r_D} \left(1 + \frac{r}{r_D}\right)^2.$$

$$\Phi_{ea}(r) = -\frac{e^2 \alpha}{2r^4 (1 - 4\lambda^2 / r_D^2)} \left(e^{-Br} (1 + Br) - e^{-Ar} (1 + Ar) \right)^2$$



Структурные свойства частично ионизованной водородной плазмы

Уравнение Орнштейна-Цернике:

$$h(\vec{r}) = c(\vec{r}) + n \int c(\vec{r} - \vec{r}') h(\vec{r}') d\vec{r}'_3,$$

где $h(\vec{r}) = g(\vec{r}) - 1$ - полная корреляционная функция,

$c(\vec{r})$ - прямая корреляционная функция.

Гипперцепное приближении:

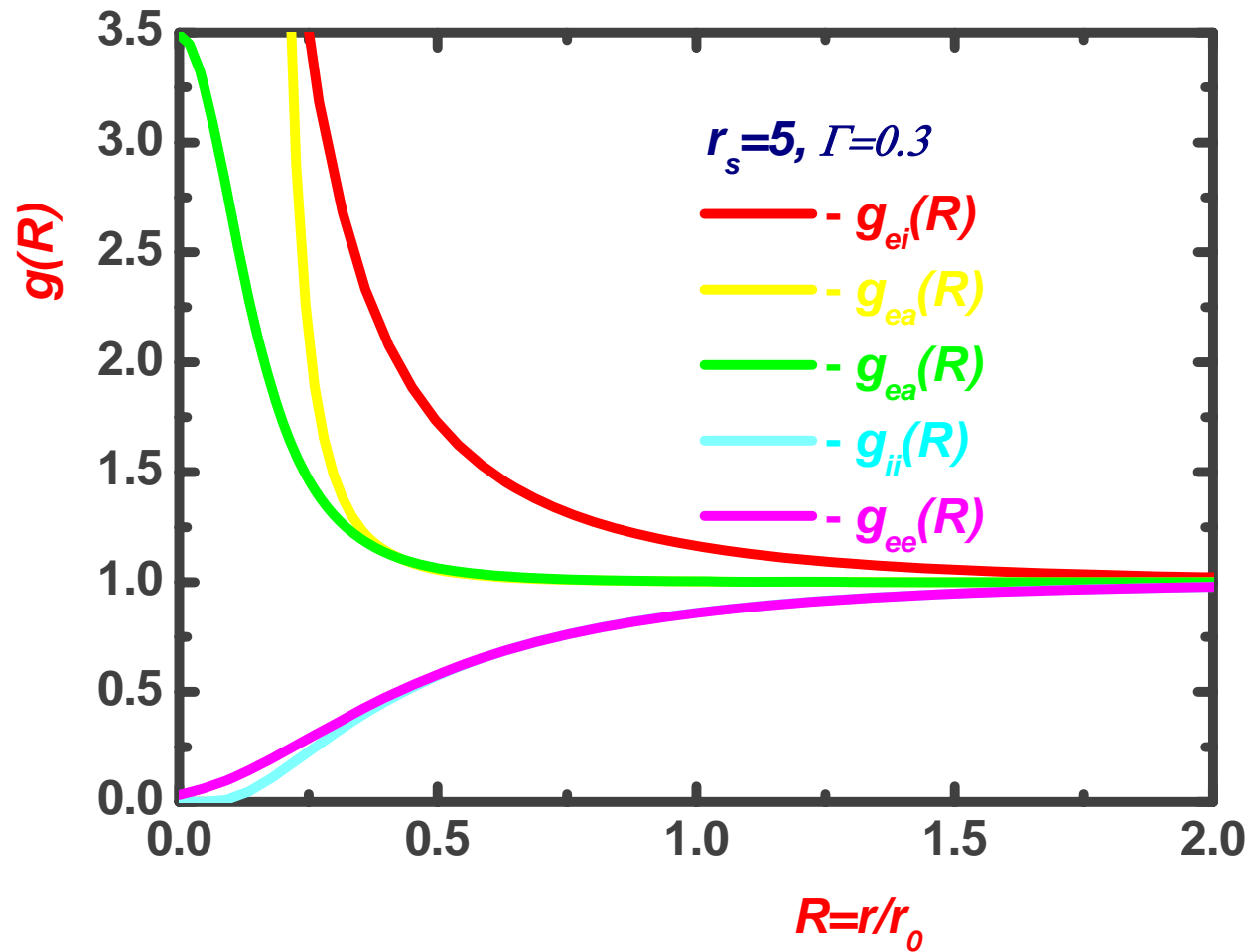
$$C_{\text{ГПЦ}}(r) = h(r) - \ln g(r) - \frac{\Phi(r)}{k_B T}$$

Уравнение для многосортных систем:

$$h_{ab}(\vec{r}) = c_{ab}(\vec{r}) + \sum_{d=1}^N n_d \int c_{ad}(\vec{r} - \vec{r}') h_{db}(\vec{r}') d\vec{r}'.$$



Радиальные функции распределения частично ионизированной водородной плазмы





Термодинамические свойства частично ионизованной водородной плазмы

Внутренняя энергия плотной квазиклассической частично ионизованной водородной плазмы:

$$E = \frac{3}{2} N k_B T - \pi \sum_{a=i,e,n} n_a \sum_{b=i,e,n} n_b \int_0^{\infty} \Phi_{a,b}(r) g_{a,b}(r) r^2 dr.$$

Давление плотной квазиклассической частично ионизованной водородной плазмы:

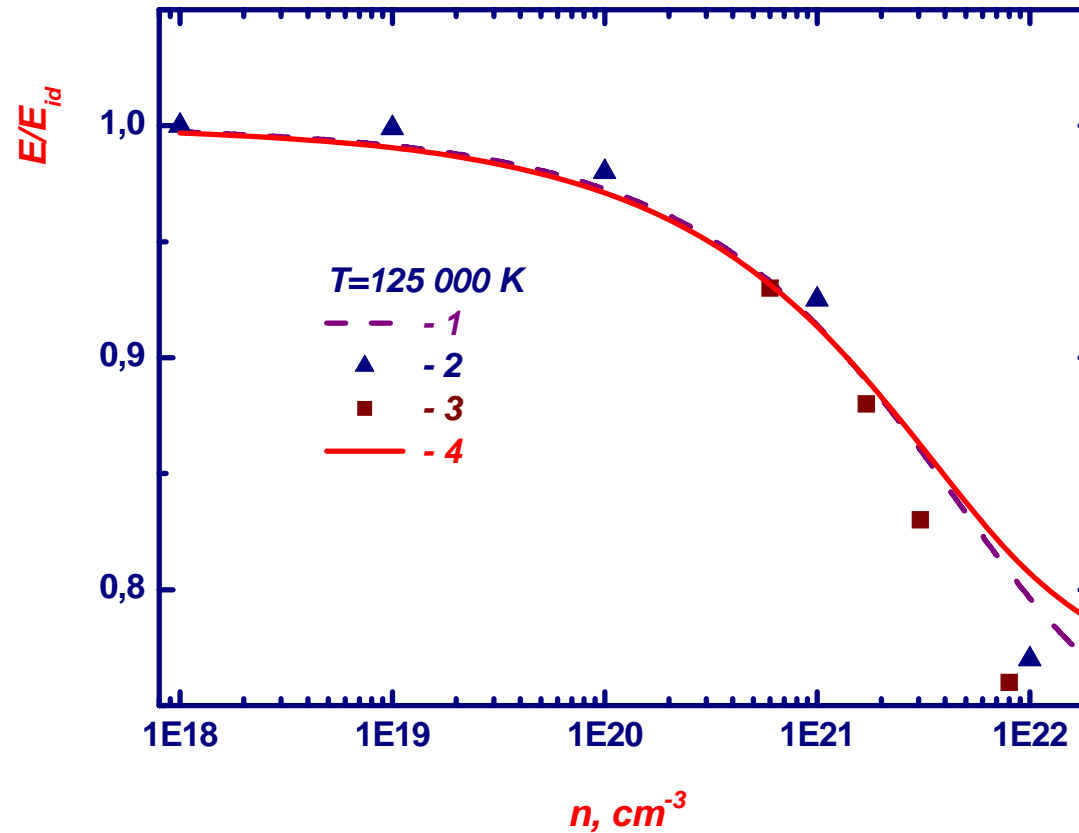
$$P = n k_B T - \frac{2}{3} \pi \sum_{a=i,e,n} n_a \sum_{b=i,e,n} n_b \int_0^{\infty} \frac{\partial \Phi_{a,b}(r)}{\partial R} g_{a,b}(r) r^3 dr.$$

Уравнение Гюгоньо:

$$H(V, P, E) = E - E_0 + \frac{1}{2} (V - V_0) (P + P_0) = 0,$$



Внутренняя энергия частично ионизованной водородной плазмы



1 – на основе потенциала Букингема;

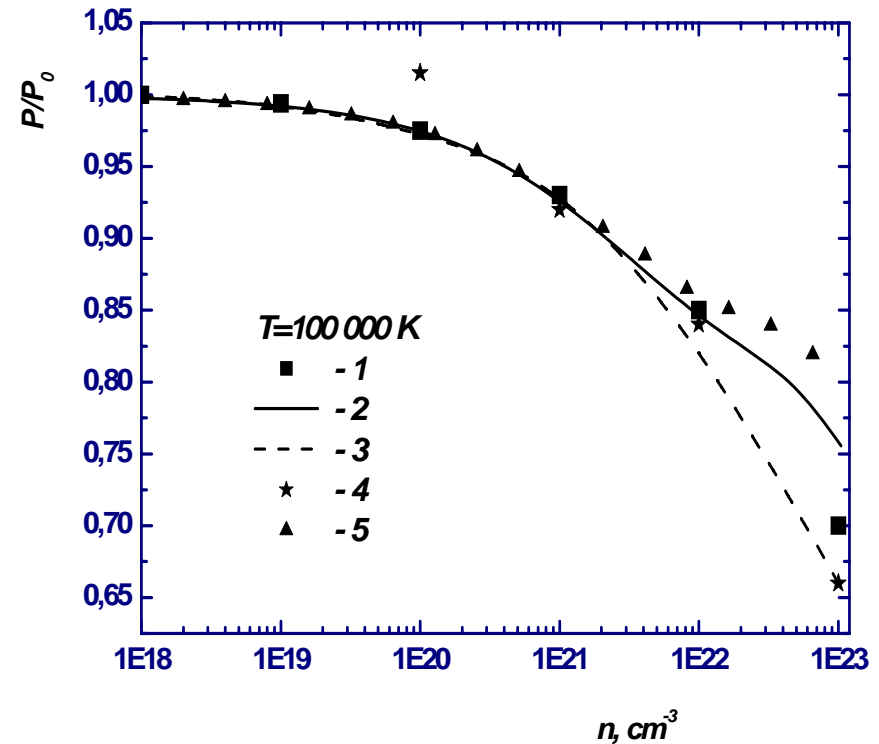
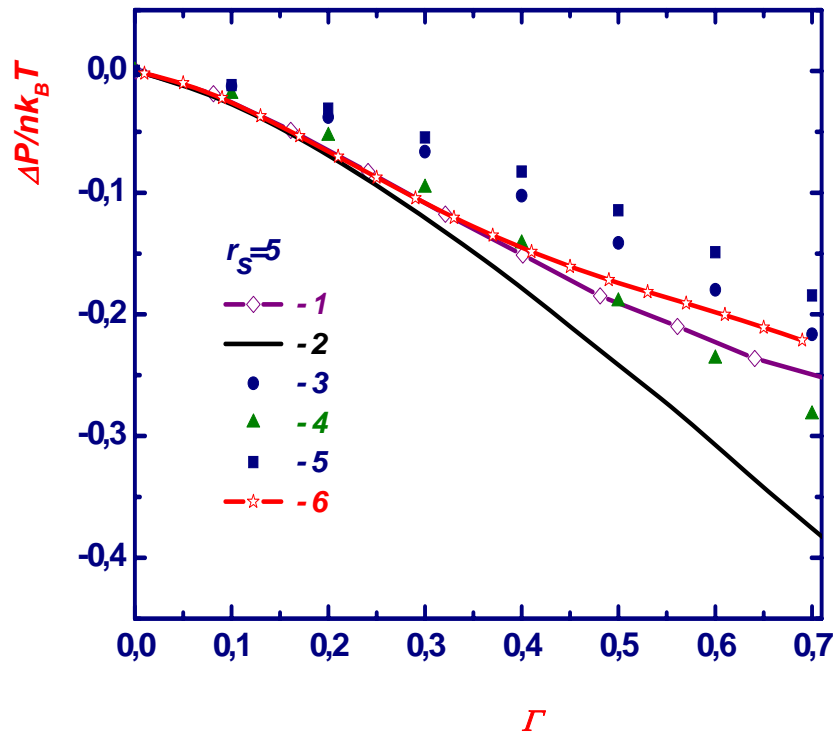
2 – Kraeft W D, Kremp D, Ebeling W, Ropke G, Akademie-Verlag, Berlin, 1986

3 – Монте-Карло;

4 – на основе поляризационного потенциала.



Уравнение состояния частично ионизованной родной плазмы



- 1 – на основе потенциала Букингема;
- 2 – полностью ионизованная плазма;
- 3, 5 – Ebeling W, Kraeft W D, Kremp D, Akademie-Verlag, Berlin, 1976;
- 4 – Arhipov Yu V, Baimbetov F B, Davleyov A E, 2005 *Phys. Plasmas* **12** 082701;
- 6 – на основе поляризационного потенциала

- 1 – методом функции Грина;
- 2 – на основе потенциала Букингема;
- 3 - приближение Монрола-Варда;
- 4 - моделирование молекулярная динамика;
- 5 – на основе поляризационного потенциала.



Состав частично ионизованной плазмы алюминия

* Система уравнений Саха:

$$n_0 = \frac{1}{2} n_{1+} \exp[\beta(\mu_e^{id} + E_{ion}^{1+} + \Delta\mu_1)],$$

□ □ □

$$n_{4+} = 2n_{5+} \exp[\beta(\mu_e^{id} + E_{ion}^{5+} + \Delta\mu_5)].$$

* Закон сохранения числа ядер: $\sum_{k=1}^5 n_k + n_0 = const.$

* Закон сохранения полного заряда в системе:

$$\sum_{k=1}^5 kn_\alpha = n_e.$$

где μ_α - химические потенциалы частиц плазмы;

$\{\alpha\} = \{e, 1+, 2+ \dots 5+, 0\}$ - сорта частиц;

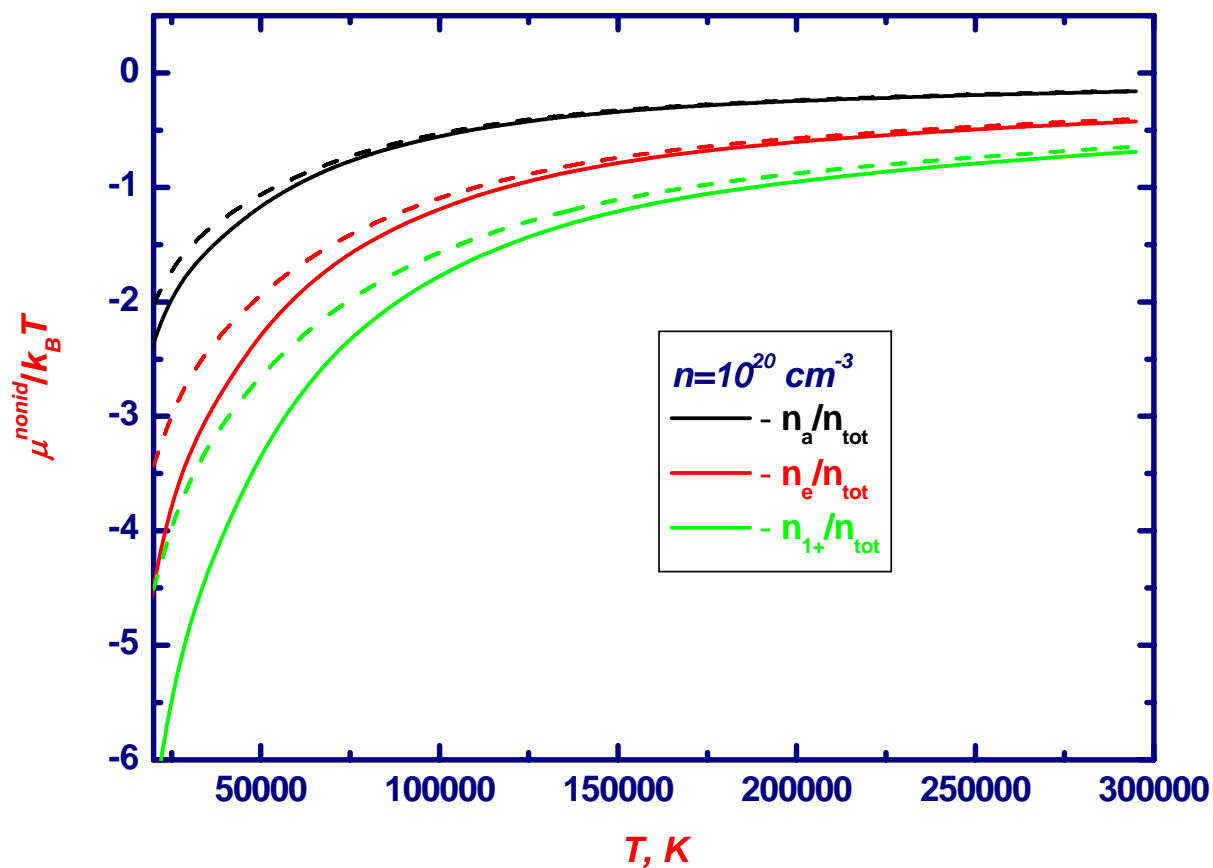
$\Delta\mu_k = \mu_e^{nonid} + \mu_k^{nonid} - \mu_{k-1}^{nonid}$ - определяется поправками на неидеальность к химическим потенциалам.

Поправка к химическому потенциалу обусловленная поляризационным взаимодействием зарядов с нейтрами:

$$\mu_{eAl^0}^{nonid} = n_{Al^0}^0 B^{PP}, \quad B^{PP} = \int d^3r \Phi_{ea}(r).$$



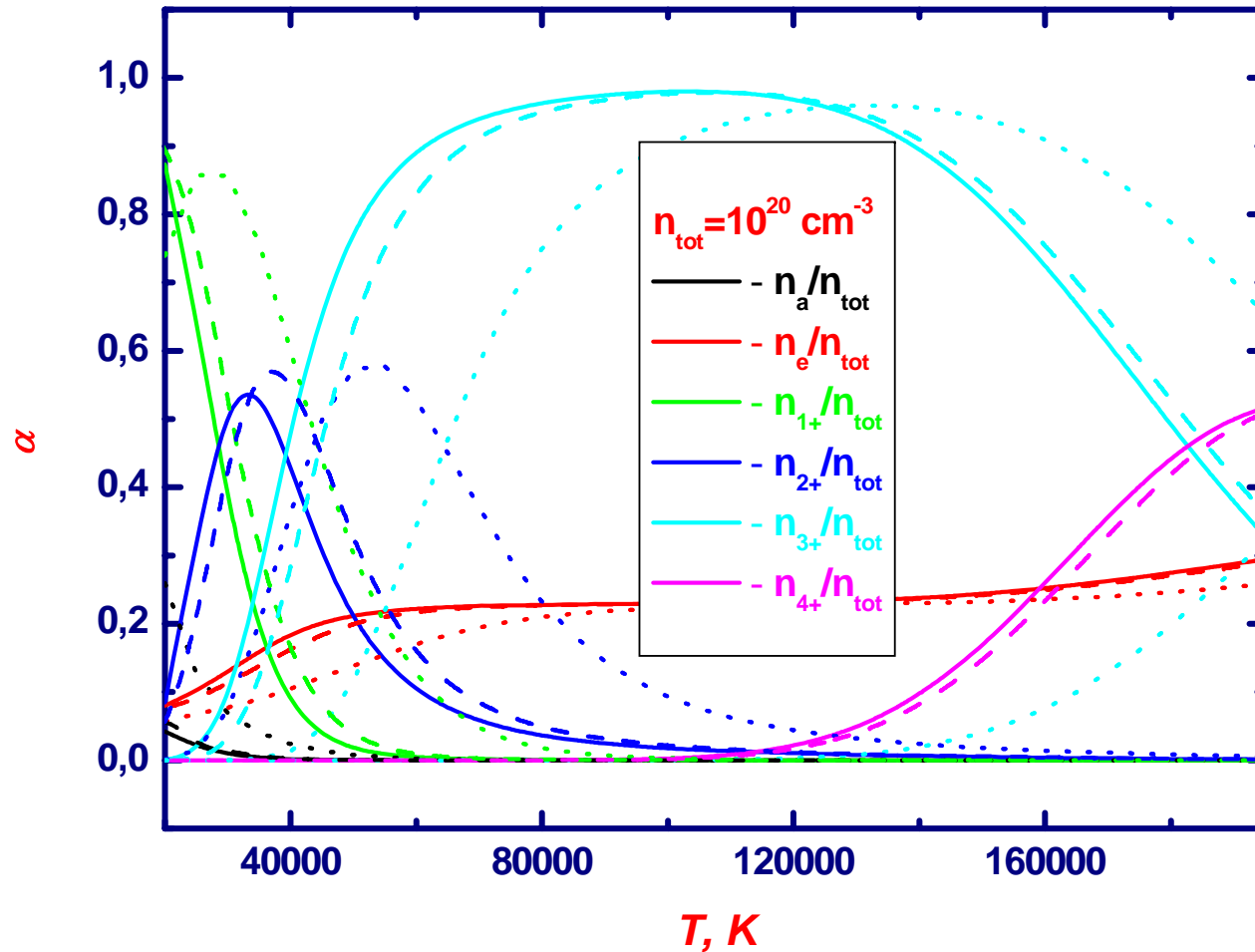
Снижения потенциалов ионизации частично ионизованной алюминиевой плазмы



Сплошная линия – на основе Дебаевской поправки;
Пунктирная линия – результаты данной работы



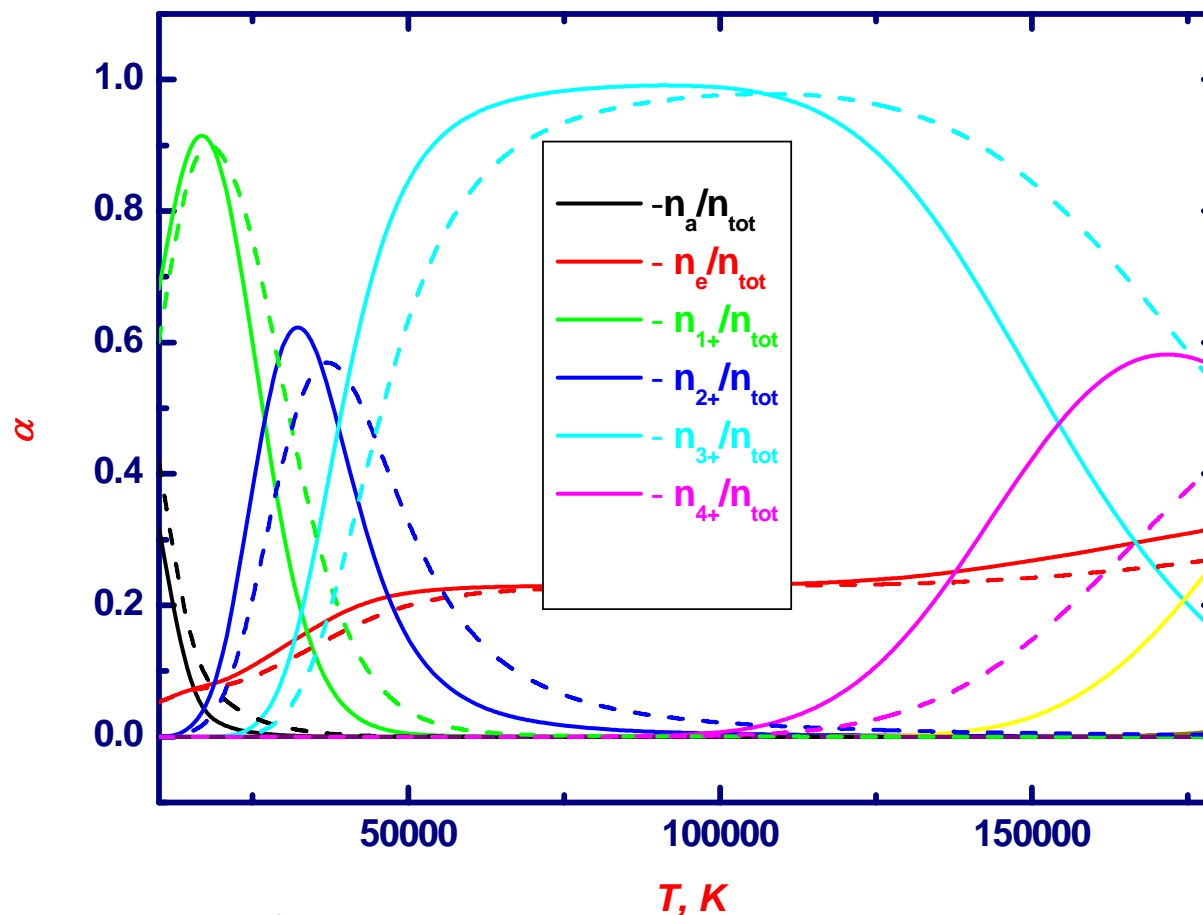
Состав частично ионизованной алюминиевой плазмы



Точечные кривые – без снижения потенциала ионизации;
Пунктирные линии – на основе Дебаевской поправки;
Сплошные линии – результаты данной работы



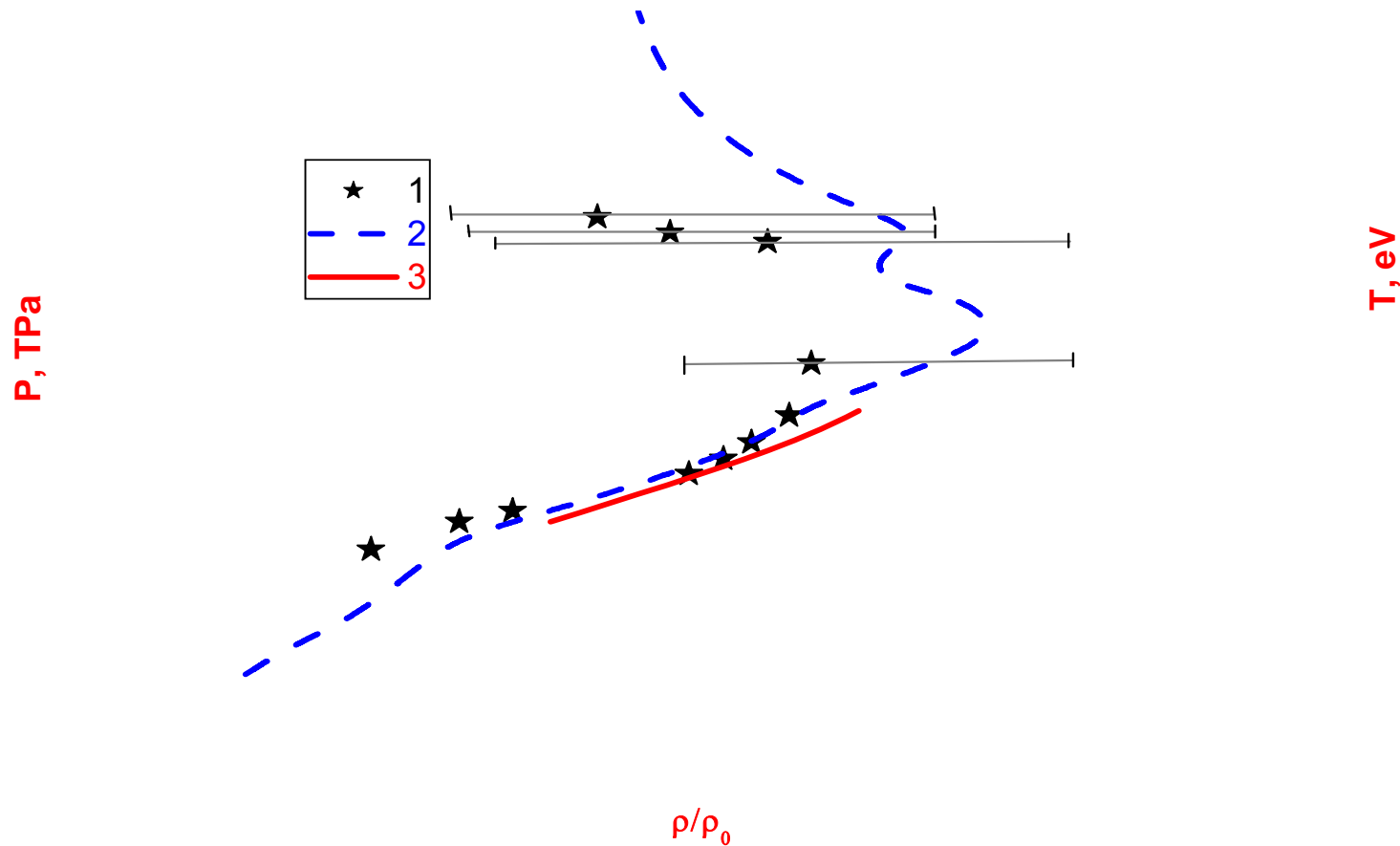
Состав частично ионизованной алюминиевой плазмы



Точками – без снижения потенциала ионизации;
Пунктирные линии – на основе Дебаевской поправки;
Сплошные линии – результаты данной работы



Уравнение состояния частично ионизованной алюминиевой плазмы



1 А.С.Владимиров, Н.П.Волошин, В.Н.Ногин, А.В.Петровцев, В.А.Симоненко. *Ударная сжимаемость Al при давлениих $P > 1$ Гбар.* Письма в ЖЭТФ, 39, стр. 69 (1984);

2 В.К.Грязнов, И.Л.Иосилевский, В.Е.Фортов. *Термодинамические свойства ударно сжатой плазмы в представлении химической модели.* В сб. *Ударные волны и экстремальные состояния вещества.* Под ред. В.Е. Фортова и др. М: НАУКА, с. 342 (2000);

3 Результаты представленной работы.

Спасибо за внимание!!!

