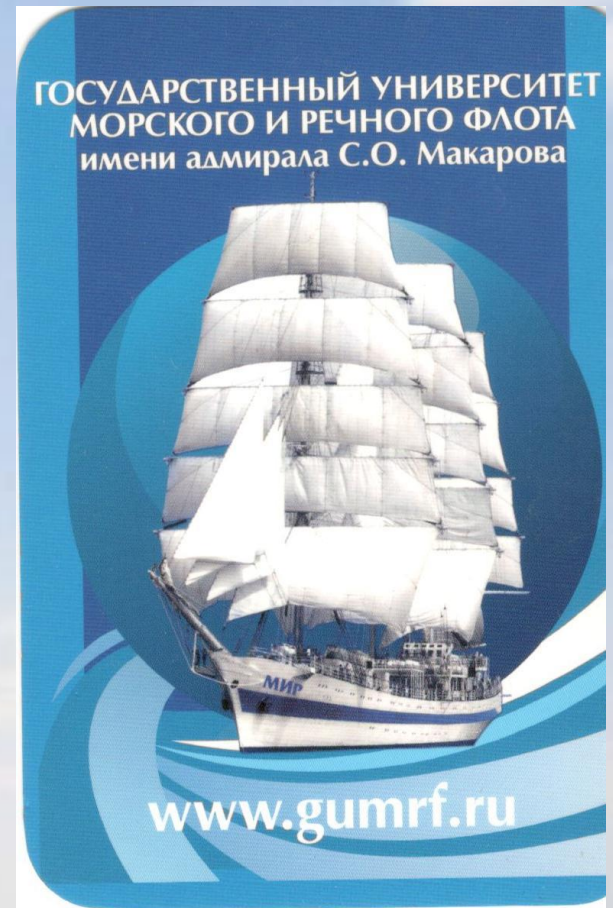


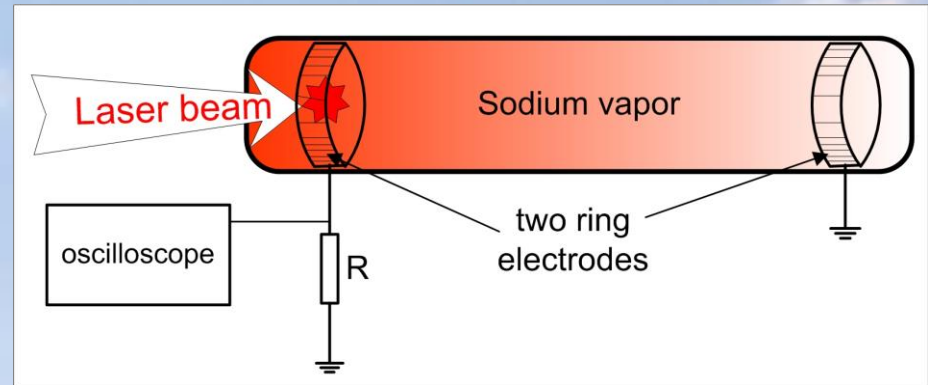
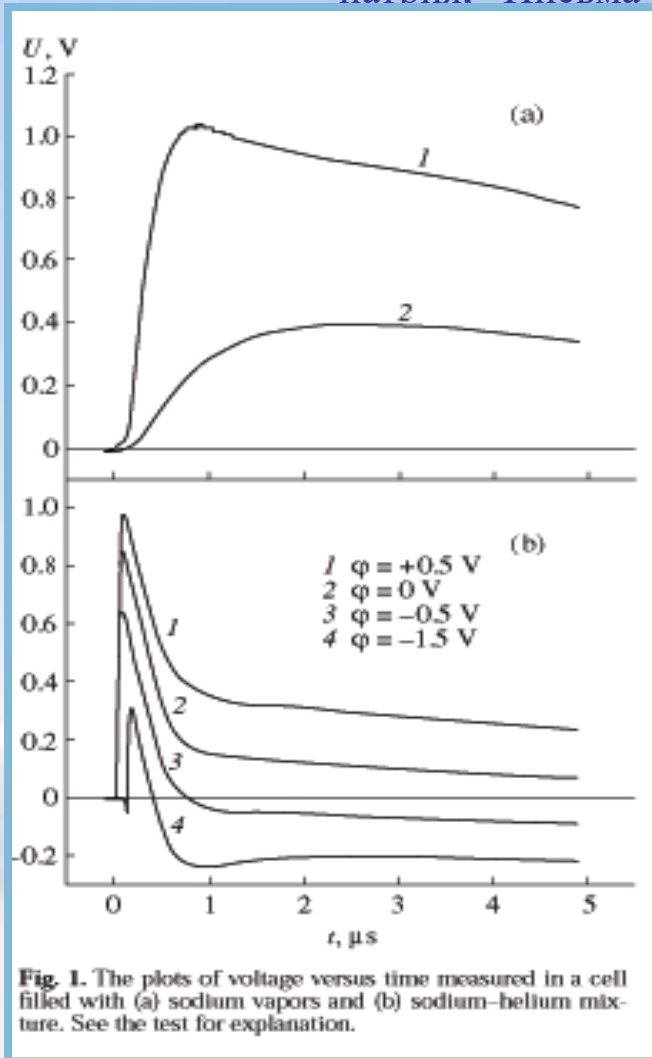
**Параметры плазмы вблизи катода плазменного
фотоэлектрического преобразователя.**

Горбунов Николай



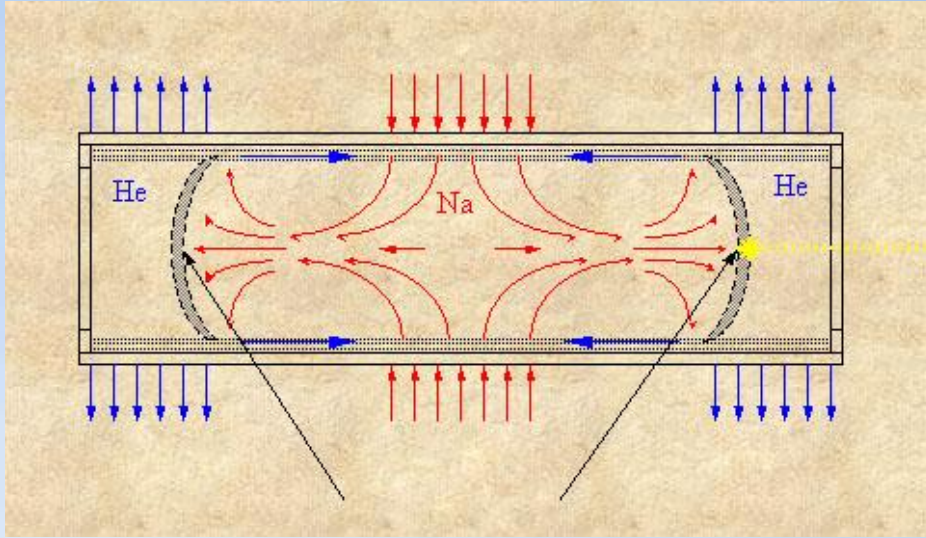
Первое экспериментальное наблюдение

Н.А. Горбунов и Т. Stacewicz, “Наблюдение фотоЭДС при резонансном возбуждении паров натрия.” Письма в ЖТФ., Т. 26, №. 15, стр. 21–26, 2000.



- The initial experimental studies of photo-EMF in plasma were performed in a glass cell filled with sodium vapors. The resonance pulsed laser radiation was used to produce photoplasma. **The maximum value of a photo-induced voltage was 4 Volts.** This value was almost one order of magnitude higher than in semiconductor devices. The intensified values of EMF resulted from **high values of the electron temperature**, which were detected in the photoplasma by the probe technique.

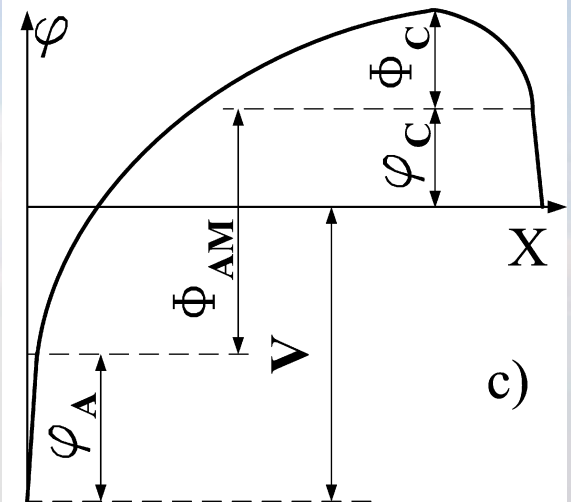
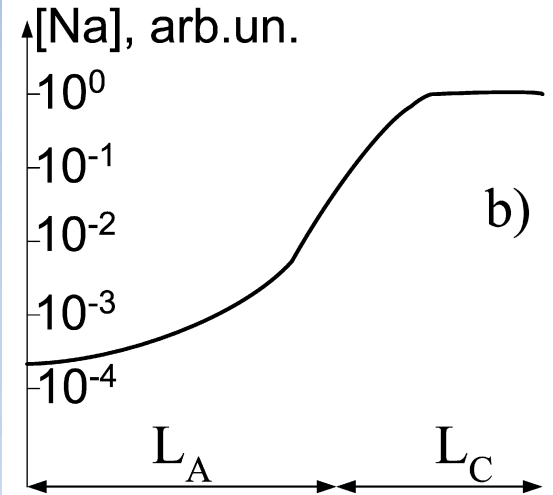
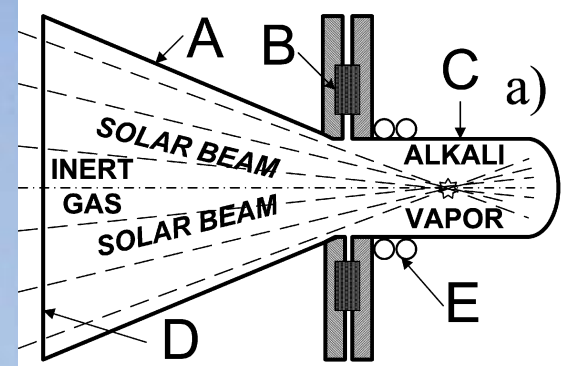
Конструкция плазменного фотоэлектрического преобразователя. ЖТФ 2009



In this device a constant density of alkali metal vapors can be maintained over a closed cycle comprising vaporization, condensation and return of the condensate to the vaporization zone due to surface tension forces.

$L_C=2d$. **The numerical aperture of the focusing system is less than 0.5.**

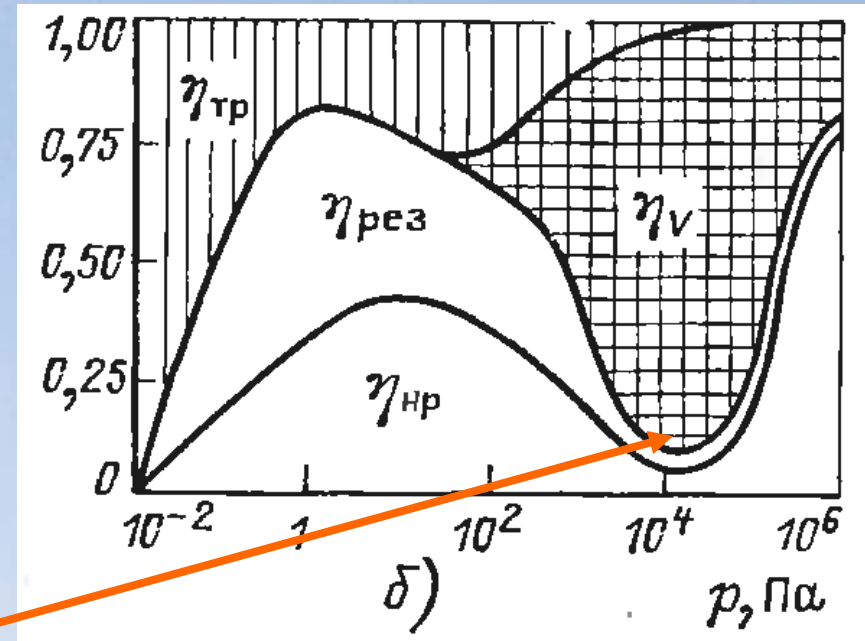
A- anode; B- electric insulator; C- cathode; D- input window; and E - external cooling system.



Operating conditions - **pressure**:
Minimum of Radiation energy losses

Баланс энергии плазмы,
полученный для газоразрядных
источников света при высокой
степени ионизации

Рохлин Г. Н. 1991 Газоразрядные
источники света.



**Ожидаемая область максимальной
эффективности плазменного
фотоэлектрического конвертора
в диапазоне давлений**

10^4 – 10^5 Pa

Оценка параметров релаксации T_e

Оценка температуры электронов на границе ЧЛТР плазмы и ионизационного слоя

$$-\frac{d}{dx} \left(\chi_e \frac{dT_e}{dx} \right) = H_{eh} + Q_{in}$$

$$H_{eh}(x, T_h) = \frac{3}{2} \delta n [v_{ea} + v_{ei}(T_e)] k (T_e(x) - T_h(x))$$

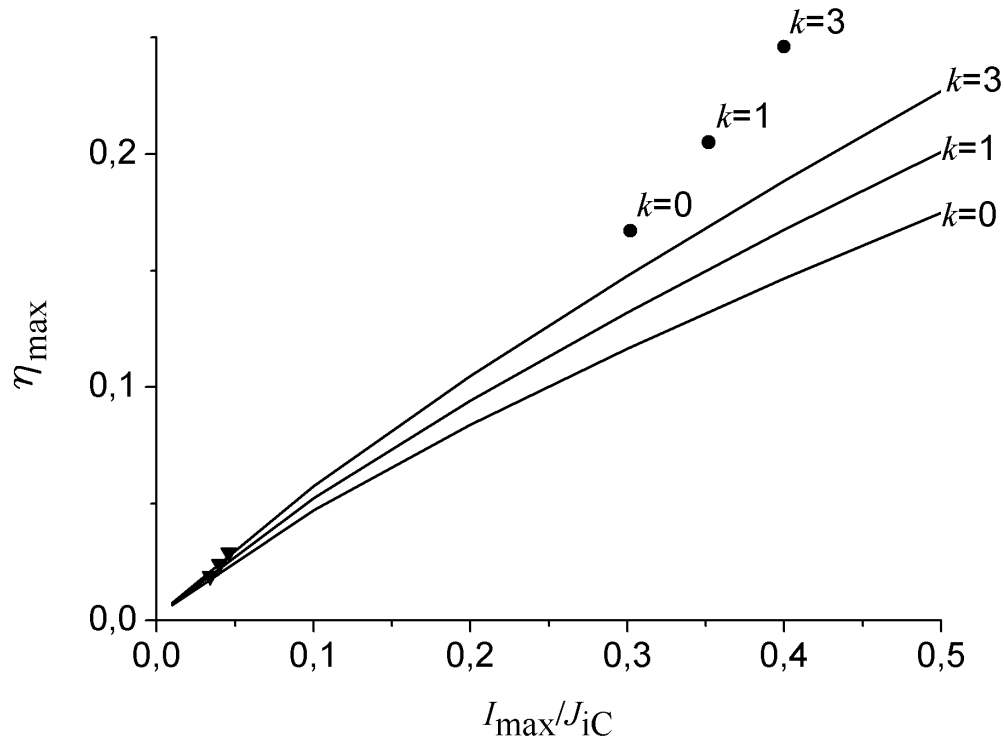
$$T_{e0}(x) = T_P - (T_P - T_{eC}) \exp\left(-\frac{x}{L_{Te}}\right) \quad L_{Te} = \frac{\chi_e (T_P - T_{eC})}{\Gamma_e}$$

$$\Gamma_e(T_{eC}) = \chi_e \left. \frac{dT_e}{dx} \right|_{x=0} = j_C (E_i + e\Delta\phi_C + 2kT_{eC} / e) \quad j_C = D_a \frac{n(T_{eC})}{\sqrt{2}L_i}$$

$$\Gamma_h = -\chi_h(T_W) \left. \frac{dT_h}{dx} \right|_{x=0} \quad L_i = \frac{1}{n} \sqrt{\frac{D_a}{\alpha_{rec}(T_{eC})}}$$

Эффективность прямого фотоэлектрического преобразования.

Gorbunov N, Flamant G. 2015 PCPP



1) Необходимо нагреть центральную часть ЛТР плазмы до температуры $T_p=4500K$

2) $k = j_{em}/i_C$ – важную роль играет термоэмиссия электронов с катода

Оптимальные условия – затраты на ионизацию должны примерно равняться выносу тепла на стенку за счет теплопроводности тяжелых частиц: $\Gamma_e/\Gamma_h = 1$

Трехкомпонентная модель плазмы

- Уравнение баланса тяжелых частиц

$$-\frac{d}{dx} \left(\chi_h \frac{dT_h}{dx} \right) = H_{eh} + Q_h$$

- Модель ЧЛТР; $Q=0$, $p_0=10^4$ Па

$$\frac{nN^+}{N} = K_1(T_e) \quad n = N^+$$

$$\frac{p_0}{k} = nT_e + T_h(N + n)$$

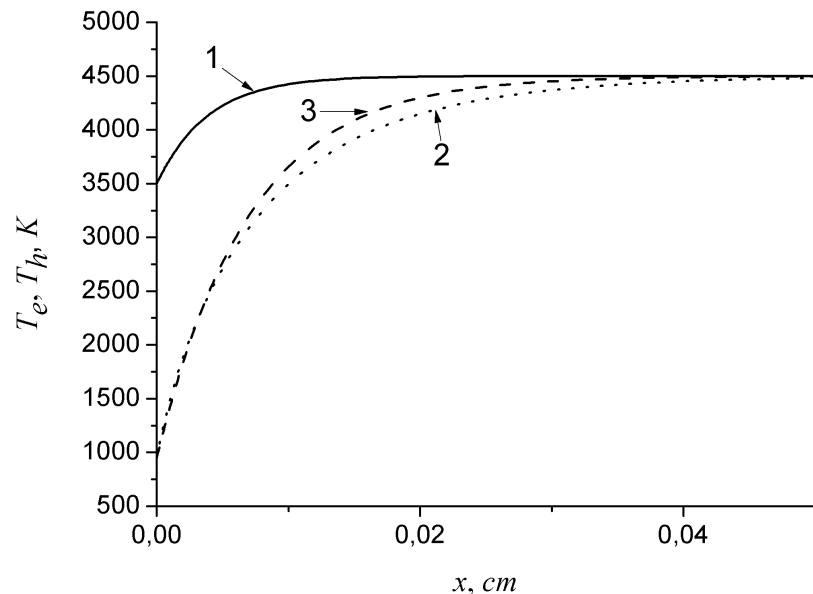
$$\Gamma_h = \int_0^{\infty} H_{eh}(x, T_{eC}) dx$$

$$\chi_h(T_h) = \chi_0 T_h^{0.864}$$

$$\eta(T_{eC}=3500) \approx 0,25$$

$$\eta(T_{eC}=3200) \approx 0,09$$

$$T_{h0}(x, L_{Tg}) = T_P - (T_P - T_W) \exp\left(-\frac{x}{L_{Tg}}\right)$$



Анализ неравновесных явлений

V Rat, A B Murphy, J Aubreton, M F Elchinger and P Fauchais. Treatment of non-equilibrium phenomena in thermal plasma flows. J. Phys. D: Appl. Phys. 41 (2008) 183001 (28pp)

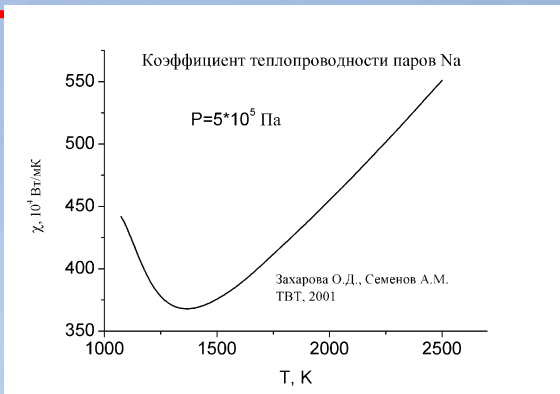
- химический состав плазмы в модели ЧЛТР;
 - реакционная теплопроводность;
- отклонения от химического равновесия в модели ЧЛТР;
- отклонение от равновесного распределения концентрации возбужденных частиц благодаря переносу излучения.

Реакционная теплопроводность.

Влияние переноса энергии диссоциации молекул Na_2

Двухпараметрическое модельное распределение $T_h(x)$

$$T_{g1}(x) = T_P - \frac{(T_P - T_W)(1 + e^{-d/L_{Tg}})}{1 + e^{(x-d)/L_{Tg}}} \quad \left. \frac{\partial \chi_h}{\partial T_h} \right|_{T < 1200} < 0$$

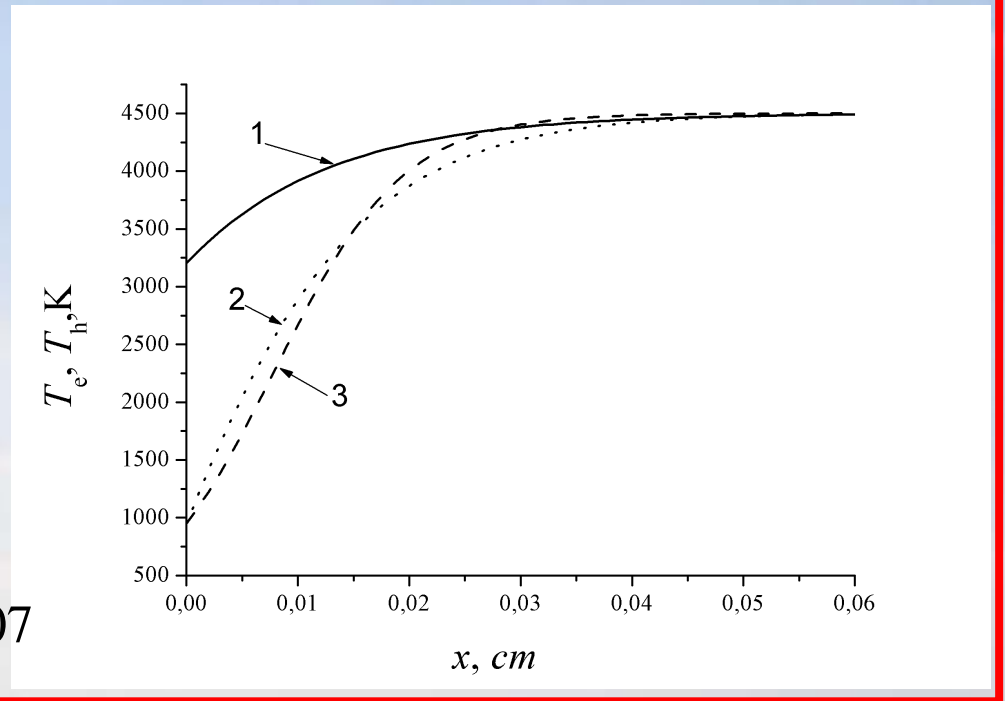


Уравнение коллокации при $x=0$

$$-\chi_h \frac{d^2 T_h}{dx^2} - \frac{\partial \chi_h}{\partial T_h} \left(\frac{dT_h}{dx} \right)^2 = H_{eh0}$$

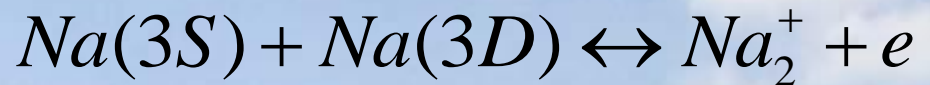
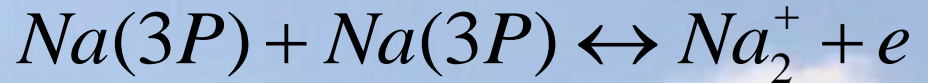
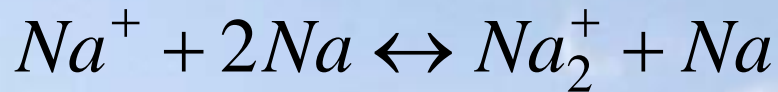
Если $T_{eC} < 3200$ К

$$\left. \frac{d^2 T_h}{dx^2} \right|_{x=0} > 0 \quad \eta(T_{eC}=3200) \approx 0,07$$



Химически неравновесная плазма

Кинетика молекулярных ионов Na_2^+



$$n_2^+ = \frac{K_C n^+ N_0^2 + j_{ai}(T_e, T_g)}{K_D N_0 + k_{dr} n_e}$$

$$Q_h = E_D (K_C n^+ N_0^2 - K_D n_2^+ N_0)$$

$$K_D(T_h, T_v) = \alpha_D(T_h) \beta_D(T_h, T_v)$$

$$\beta_D(T_h, T_v) = \frac{T_h}{T_v} \exp\left(\frac{D}{k} \left(\frac{1}{T_h} - \frac{1}{T_v}\right)\right)$$

Модель активированного промежуточного комплекса

$$K_D N_0 \gg k_{dr} n_e$$

$$Q_h \approx E_D j_{ai}$$

$$\beta_e(T_e) N_0 (n_e) n_e + j_{ai} - \alpha_e(T_e) n_e^3 = 0$$

Модель расчета T_h с учетом ассоциативной ионизации

Модель постоянства температуры возбуждения

$$j_{ai} = k_{ai3P} [Na_{3P}]^2 \approx k_{ai3P} \left\{ \frac{p_0}{kT_h} \frac{g_{3P}}{g_{3S}} \exp\left(-\frac{\Delta E_{12}}{T_P}\right) \right\}^2$$

$$y = \exp(-d / L_g) \quad L_g(y) = \chi_g(T_W) \frac{(T_P - T_W) y}{(1 + y) \Gamma_e(T_{eC})}$$

$$y(T_{eC}) = \frac{1}{1 - \frac{\partial \ln \chi_g(T_W)}{\partial T_g} (T_P - T_W) - \frac{S_0(T_{eC}) \chi_g(T_W) (T_P - T_W)}{\Gamma_e^2(T_{eC})}}$$

$$\Gamma_e(T_{eC}) = \int_0^\infty \left\{ \frac{3}{2} \delta n_e [v_{ea} + v_{ei}] k_B (T_{e0}(x, T_{eC}) - T_h(x, y(T_{eC}))) - Q_h(T_h(x)) \right\} dx$$

Решение системы существует при $p_0 > 2 * 10^4$ Па

Результат расчета T_h с учетом ассоциативной ионизации

$T_{eC}=2500$, $p_0=5E5$ Па, $T_w=1100$ К

Для однопараметрической модели

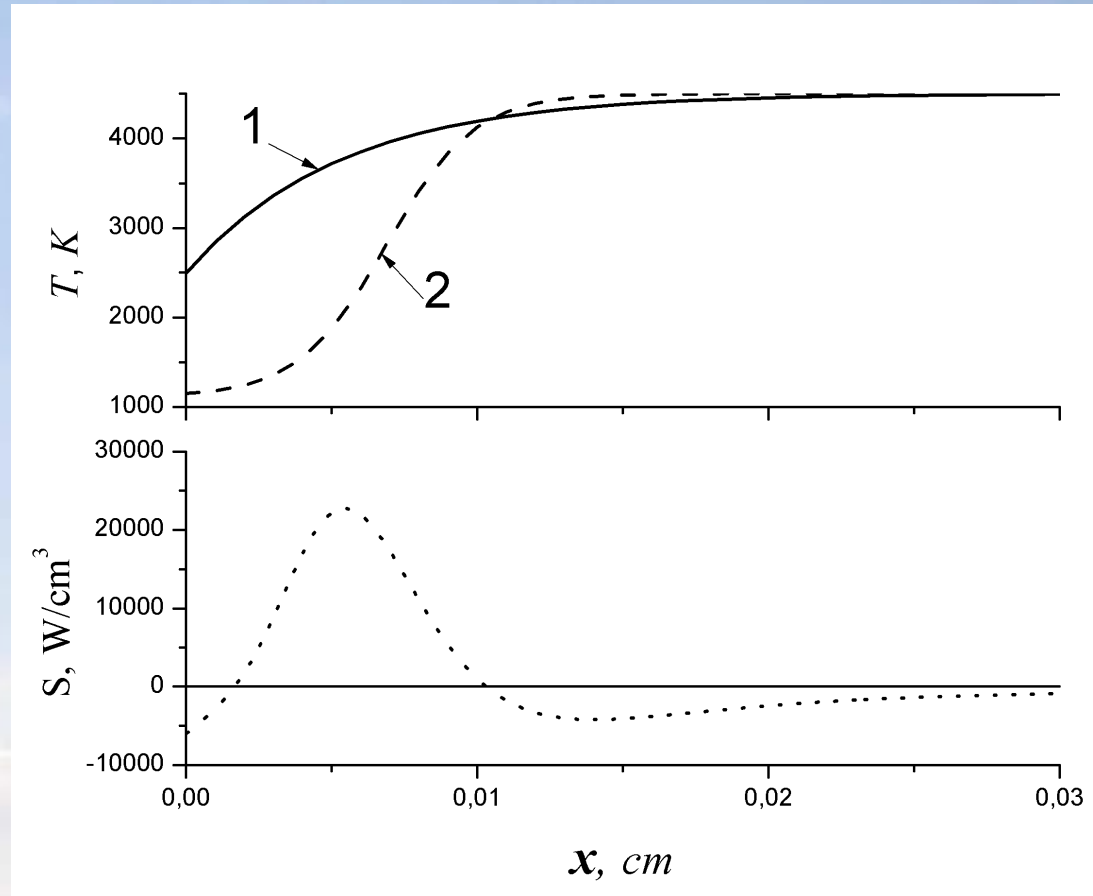
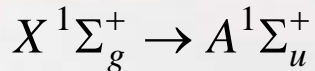
$$\Gamma_h = 184 \text{ Вт/см}^2,$$

Для двухпараметрической модели

$$\Gamma_e = \Gamma_h = 9,2 \text{ Вт/см}^2,$$

$$y_e(0) = 2.3$$

- Расширилась область действия охлаждения;
- Сузилась область действия нагрева;
- Влияние на радиационные свойства плазмы, увеличилась толщина слоя молекул Na_2 и оптическая толщина за счет молекулярного перехода



Формируется молекулярный теплоизолирующий слой

Бистабильность решений с ростом T_w

$$T_{eC}=2500, p_0=5E5 \text{ Па}, T_w=1400 \text{ К}$$

$$L_g(y) = \sqrt{\frac{(T_P - T_W) y}{-S_0 (1+y)^2} \left(\frac{\partial \chi_g(T_W)}{\partial T_g} (T_P - T_W) y + \chi_g(T_W) (1-y) \right)}$$

$$d = -L_g \ln y$$

Действительные значения L_g

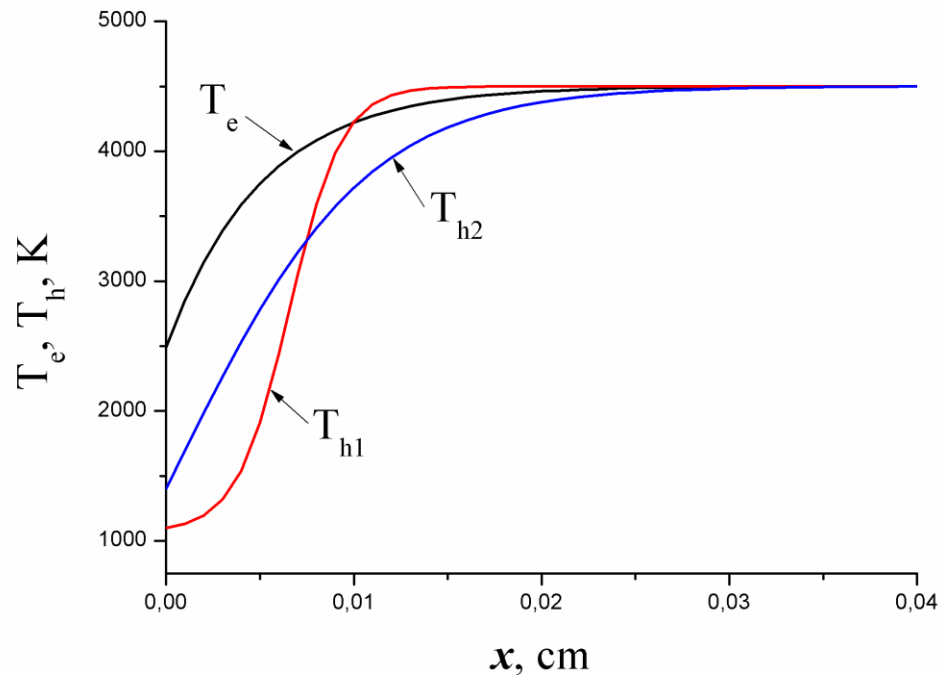
$$S_0 < 0$$

$$\frac{\partial \chi_g(T_W)}{\partial T_g} < 0 \quad y \ll 1$$

$$\frac{\partial \chi_g(T_W)}{\partial T_g} > 0 \quad y \approx 1 \quad \Gamma_h = 110$$

$$S_0 > 0$$

$$\frac{\partial \chi_g(T_W)}{\partial T_g} > 0 \quad y > 1$$



Стоит ли заниматься этой темой?

Пришло время эксперимента

Спасибо за внимание