



ЛЕТАТЕЛЬНЫЕ АППАРАТЫ НА ВОДОРОДНОМ ТОПЛИВЕ

Ю.Н. Шалимов¹, В.И.Корольков²,
И.К. Шуклин¹, Б.М. Даринский³, А.В. Руссу²

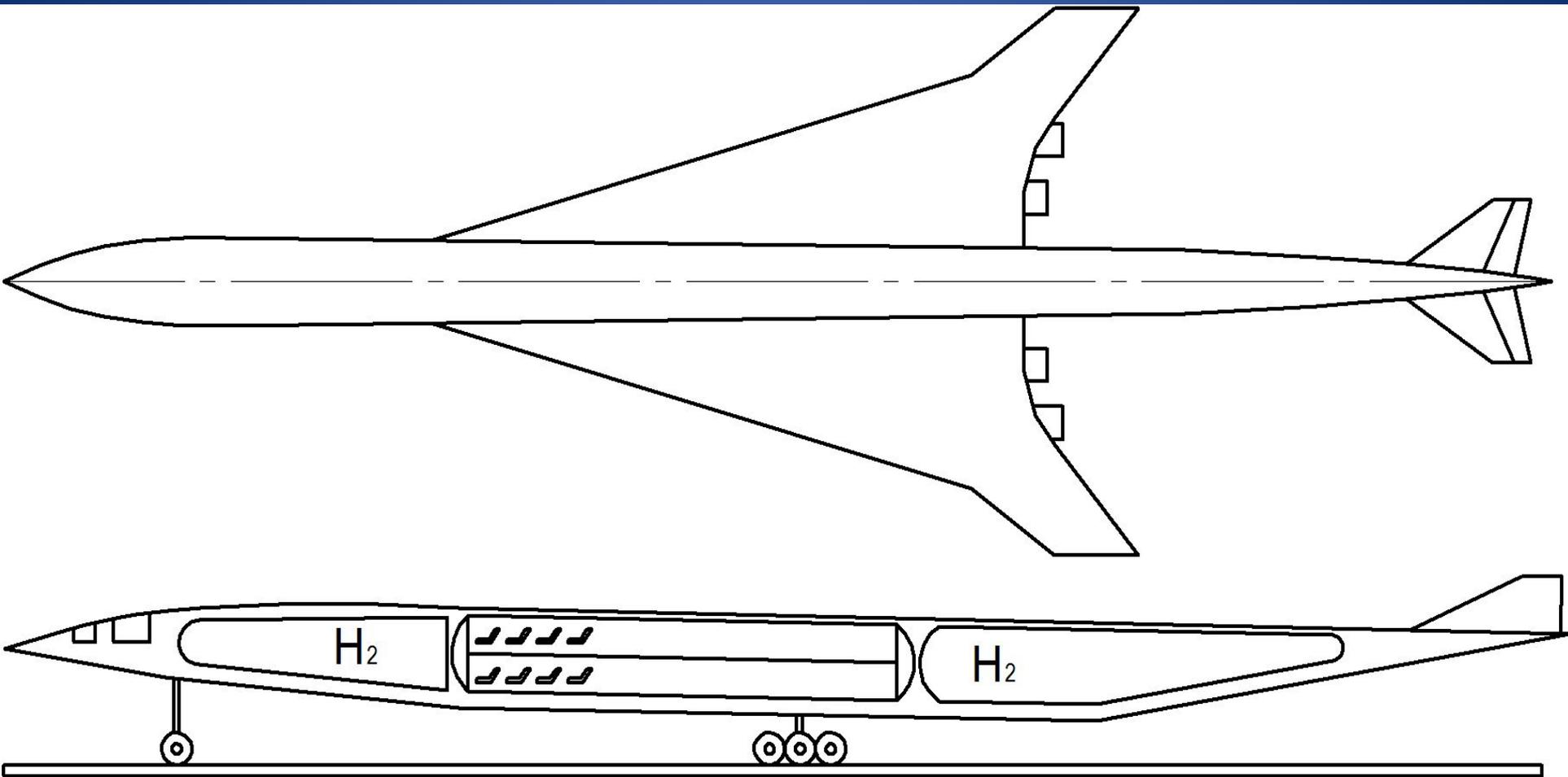
¹Военный Учебный Научный Центр Военно-Воздушных Сил «Военно-Воздушная Академия» им. Проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина

²Воронежский государственный технический университет,
каф. Самолетостроение

³Воронежский государственный университет

Воронеж 2017

самолет Ту-155 (на жидком водороде с использованием криостатных систем)



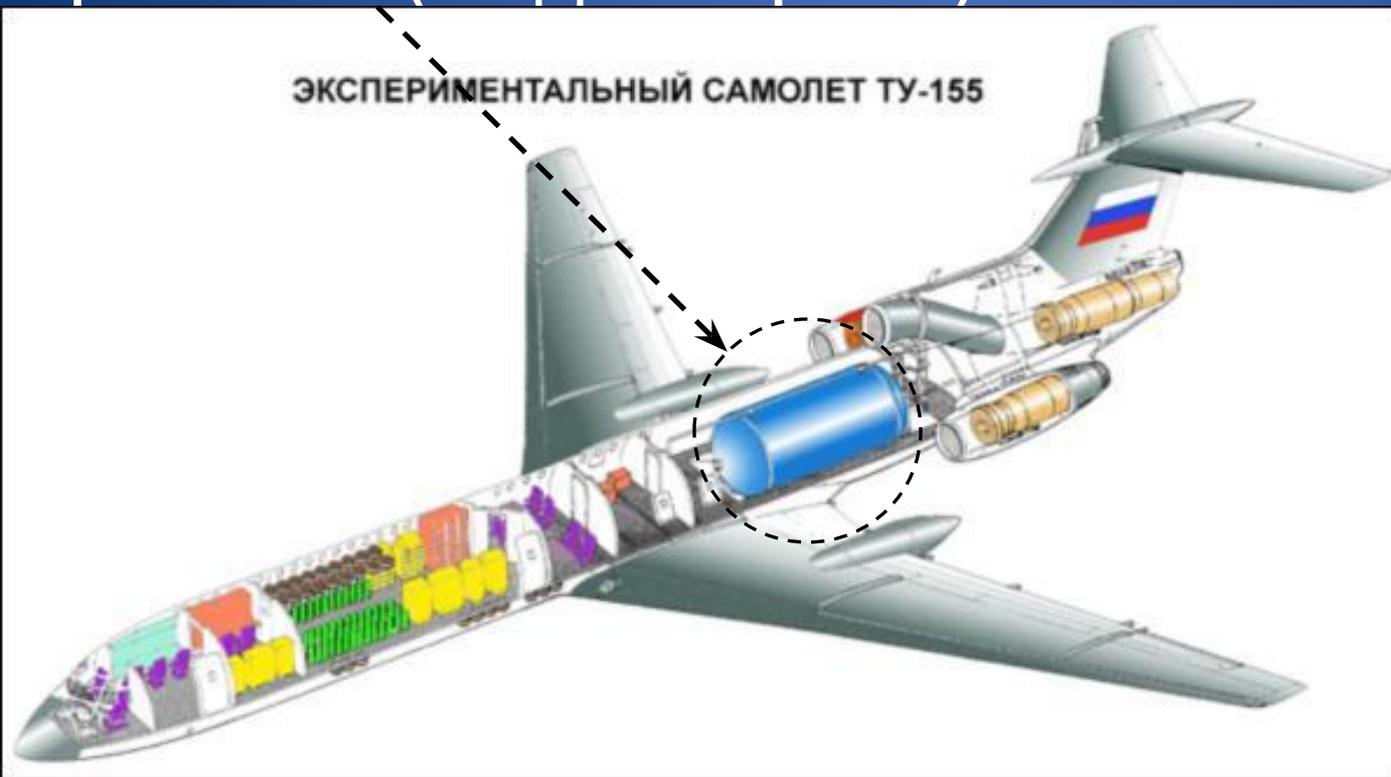
Основные проблемы

- › Получение водорода
- › Хранение водорода
- › Транспортировка водорода

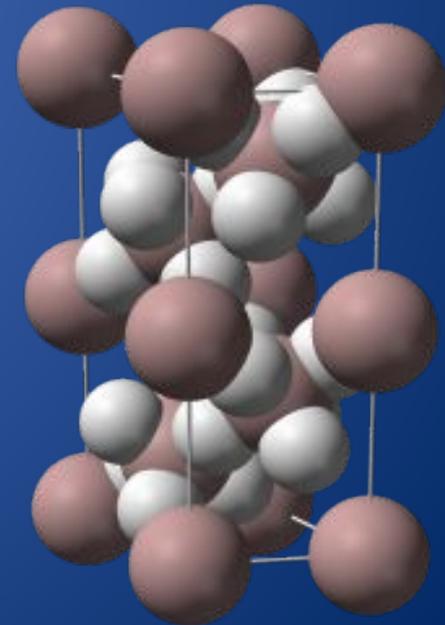
Баллон (газовая фаза)

ВОДОРОД

Криостат (жидкая фаза)



Гидрид (твердая фаза)



1 $\lg(m_{\text{э}}/m_{\text{к}})$ Номограмма содержания основных металлов в земной коре

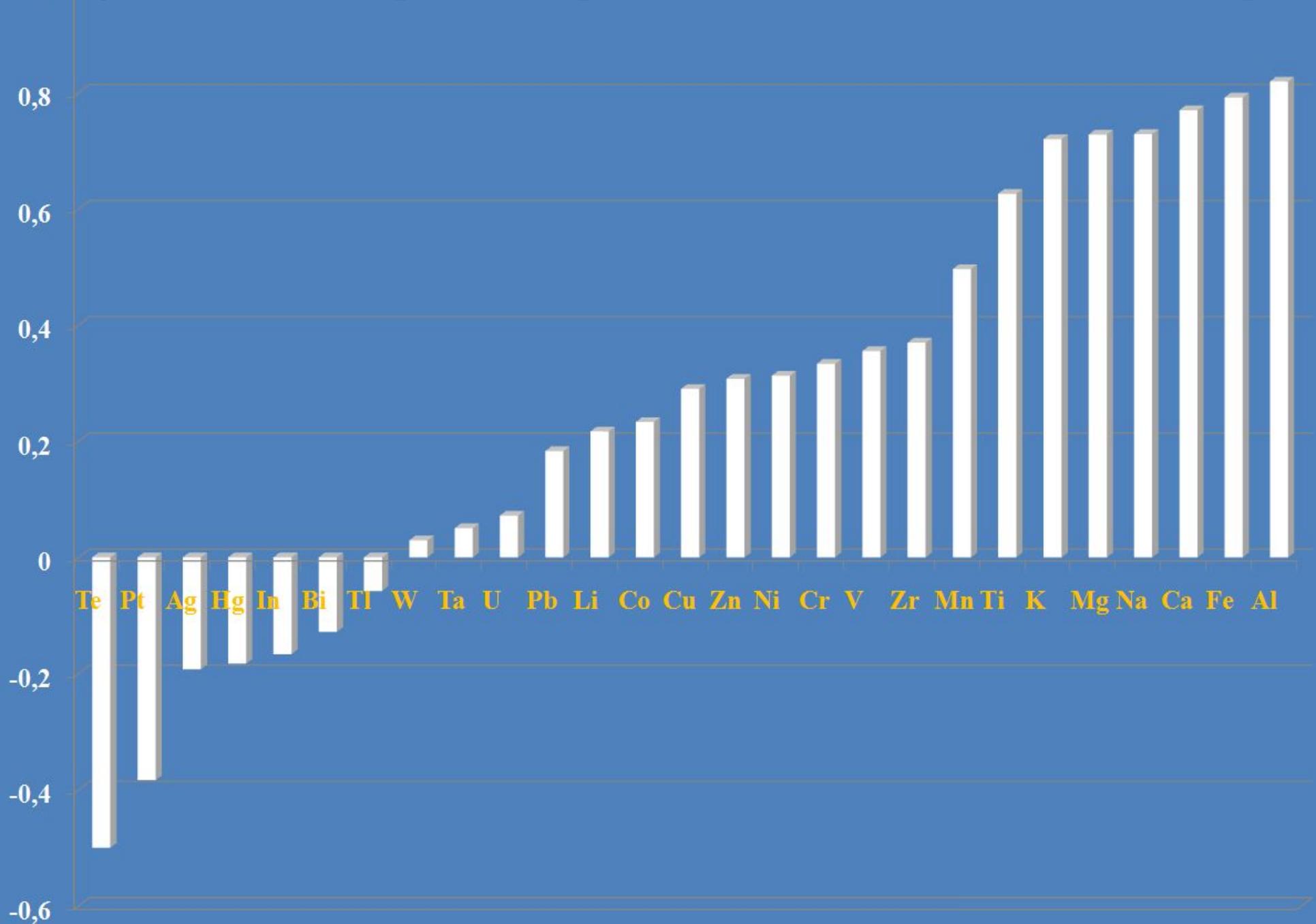


Таблица элементов, склонных к образованию гидридов



Атомный номер

23

Ванадий

V

Символ

T° кипения
T° плавления

3450 °C

50,942

1900 °C

6,1 g/cm³

Атомная масса
Плотность

[Ar] 3d3 4s2

Электронная формула

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---------|-----|------------|-----------|---------|-----------|-------------|--------------|--------------|--------------|------------|------------|----------|----------|------------|-------------|----|----|---|
| 1 | IA H | IIA | | | | | | | | | | | | | | VIIIA He | 1 | | |
| 2 | Li | Be | | | | | | | | | III A B | IV A C | V A N | VIA O | VII A F | Ne | 2 | | |
| 3 | Na | Mg | | | | | | | | | Al | Si | P | S | Cl | Ar | 3 | | |
| 4 | K | Ca | IIIB Sc | IVB Ti | VB V | VIB Cr | VII B Mn | VIII B Fe | VIII B Co | VIII B Ni | IB Cu | II B Zn | Ga | Ge | As | Se | Br | Kr | 4 |
| 5 | Rb | Sr | Y | Zr | Nb | Mo | Tc | Ru | Rh | Pd | Ag | Cd | In | Sn | Sb | Te | I | Xe | 5 |
| 6 | Cs | Ba | Lu | Hf | Ta | W | Re | Os | Ir | Pt | Au | Hg | Tl | Pb | Bi | Po | At | Rn | 6 |
| 7 | Fr | Ra | Lw | Rf | Db | Sg | Bh | Hs | Mt | Ds | Rg | Uub | Uut | Uuq | Uup | Uuh | | | 7 |

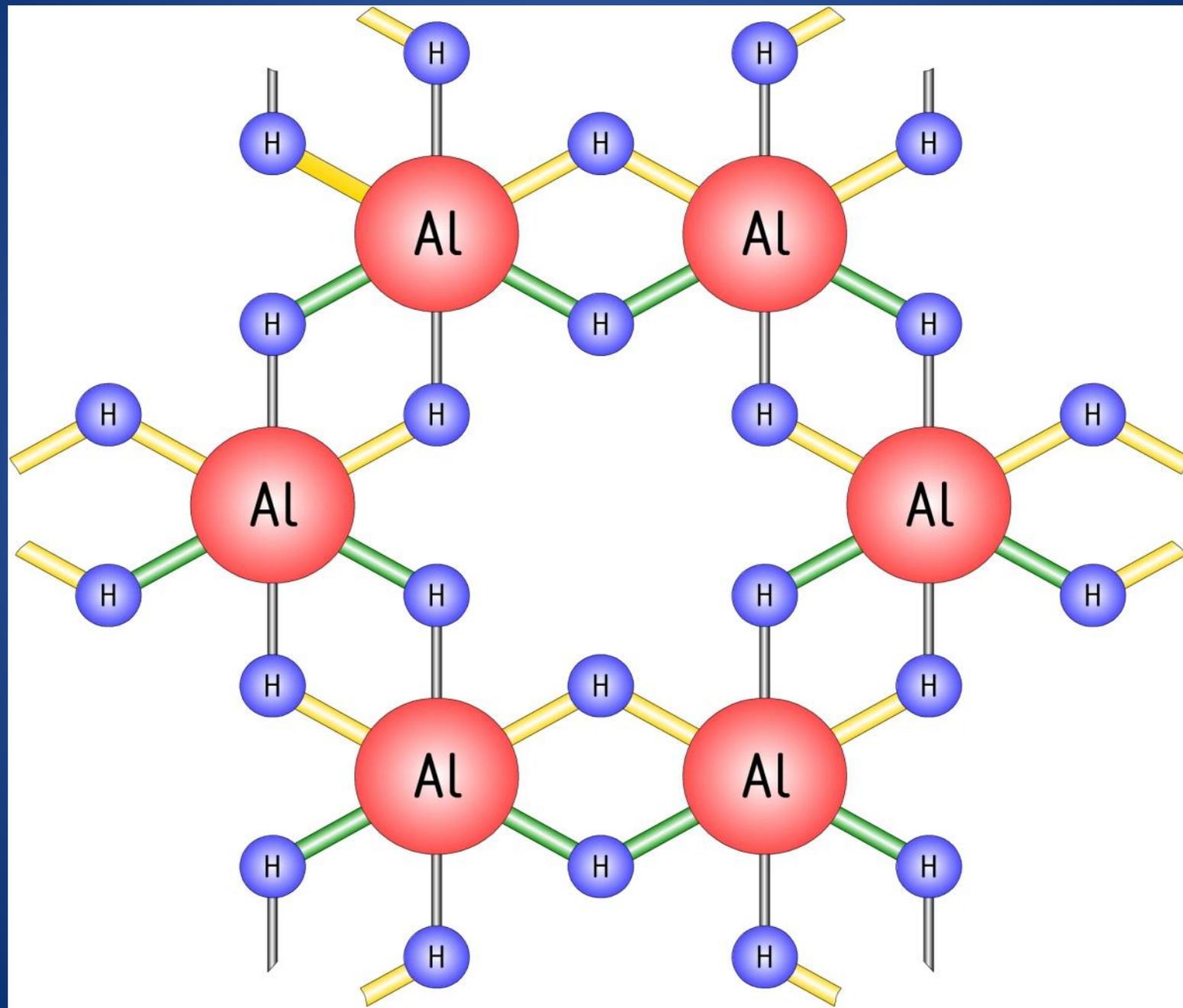
Лантаноиды 6

| | | | | | | | | | | | | | | |
|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|---|
| La | Ce | Pr | Nd | Pm | Sm | Eu | Gd | Tb | Dy | Ho | Er | Tm | Yb | 6 |
|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|---|

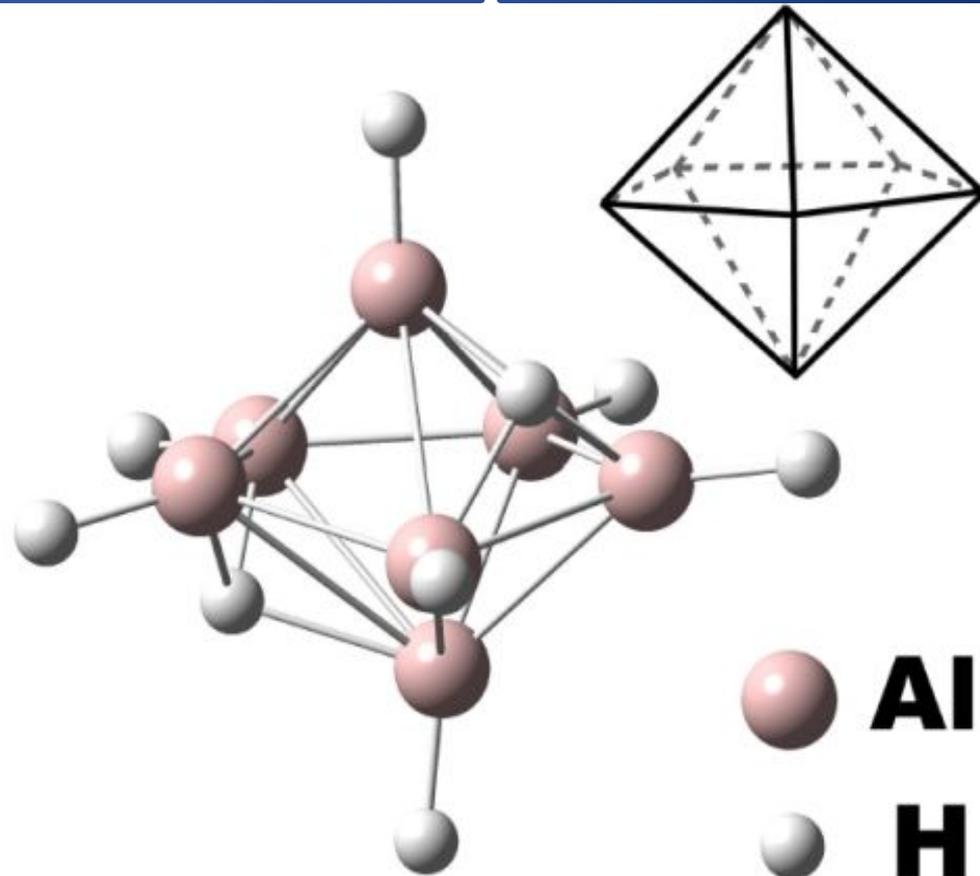
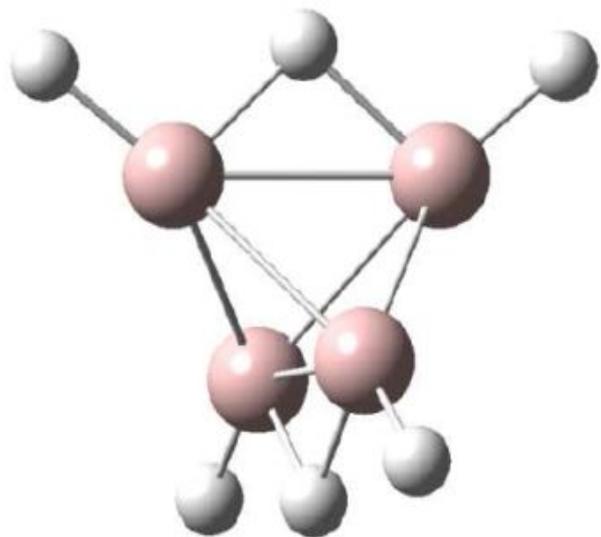
Актиноиды 7

| | | | | | | | | | | | | | | |
|----|----|----|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|---|
| Ac | Th | Pa | U | Np | Pu | Am | Cm | Bk | Cf | Es | Fm | Md | No | 7 |
|----|----|----|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|---|

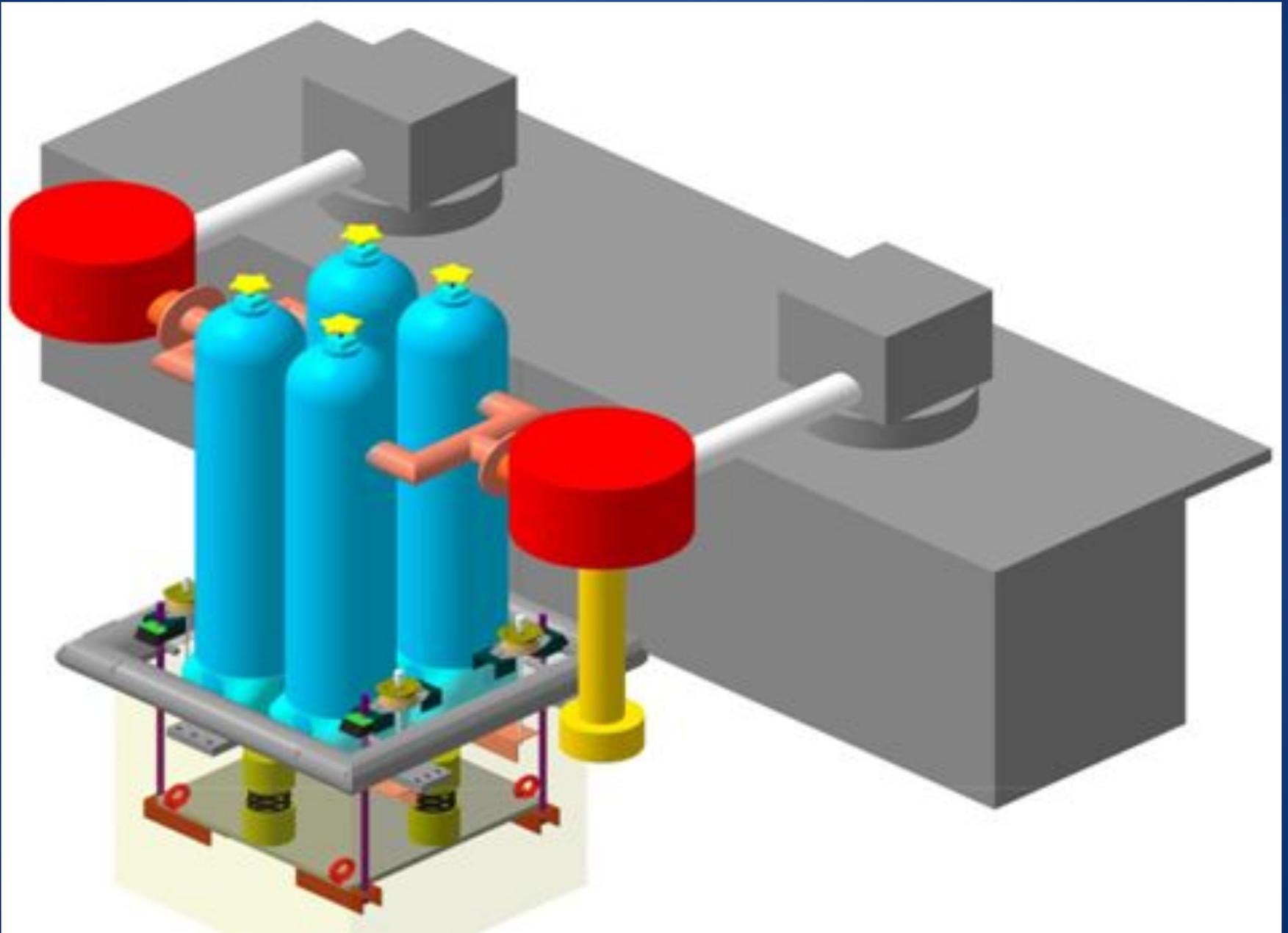
Структура гидрида алюминия



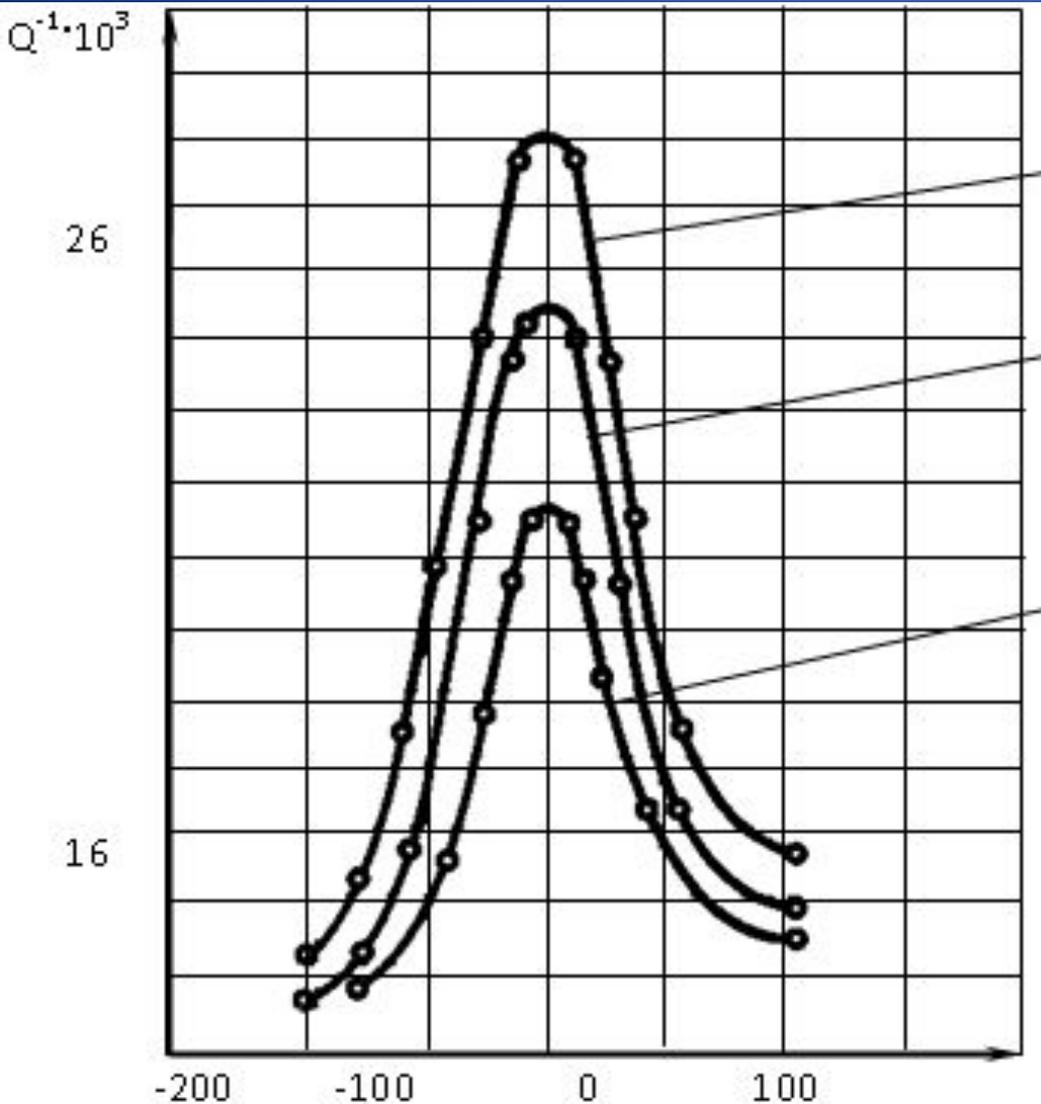
Структуры гидридов алюминия для различных кластеров



Установка внутреннего трения



Температурная зависимость внутреннего трения электролитического хрома, полученного из сернокислого электролита

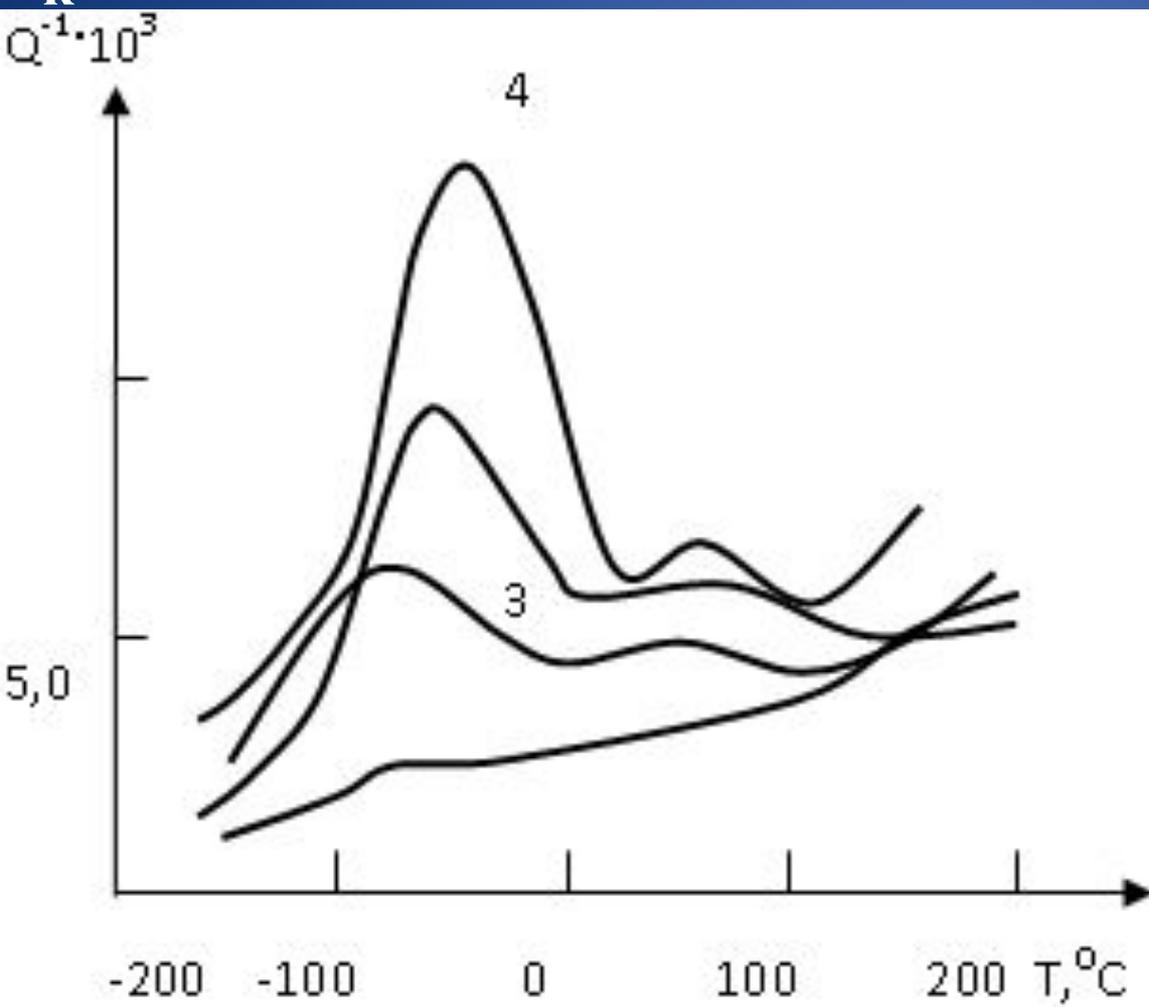


1 - импульсный режим:
 $i_k = 35 \text{ A/дм}^2$, время импульса 15 сек,
время паузы 10 сек;

2 - импульсный режим:
 $i_k = 35 \text{ A/дм}^2$, время импульса 15 сек,
время паузы 5 сек;

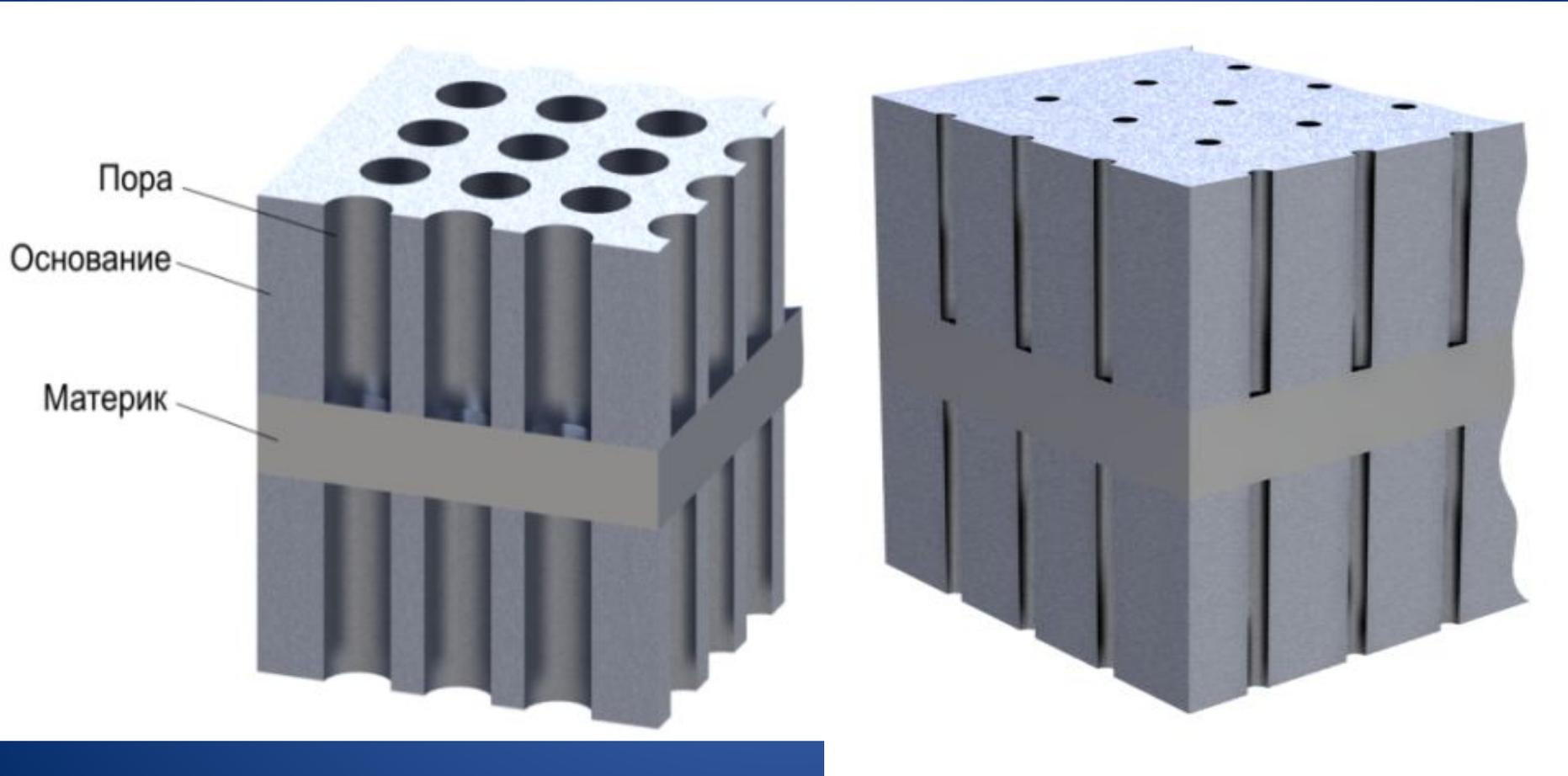
3 - непрерывный режим:
 $i_k = 35 \text{ A/дм}^2$

Температурная зависимость внутреннего трения электролитического хрома, подвергнутого наводороживанию в H_2SO_4 при $i_k = 1$ А/дм² в течение различного времени (τ)

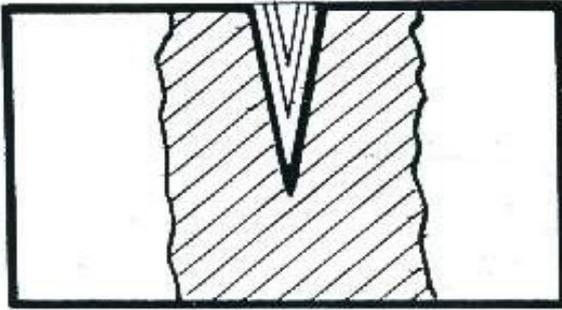


- 1 не наводороженный образец;
- 2 $\tau = 8$ минут;
- 3 $\tau = 14$ минут;
- 4 $\tau = 20$ минут

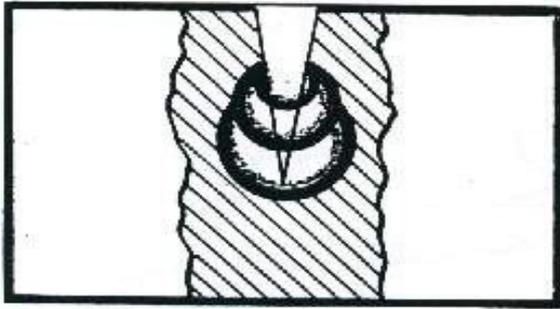
Структура идеализированной поры



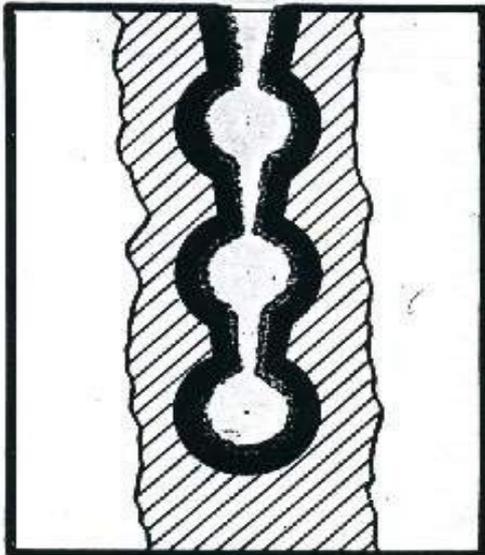
а) образование поры при действии сканирующего импульса, I стадия



б) формирование поры при действии серии импульсов, II стадия



в) профиль образующейся поры в результате последовательного действия серий сканирующих и формирующих импульсов, суммарный процесс

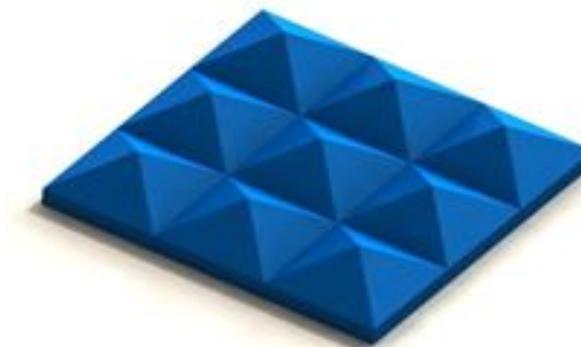
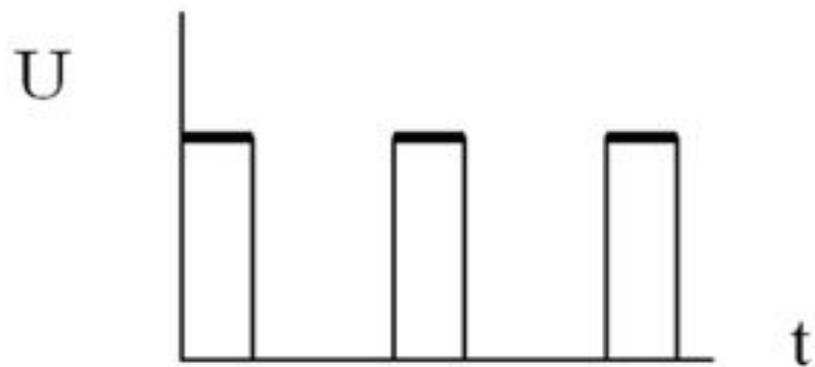


Механизм образования поры при действии частотно-модулированного импульсного тока на электроде

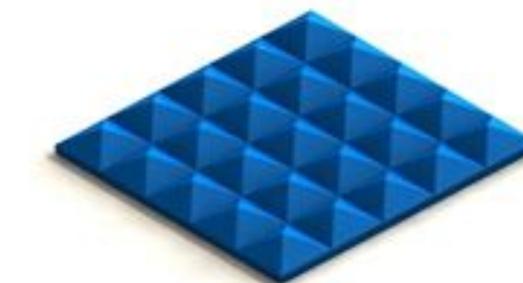
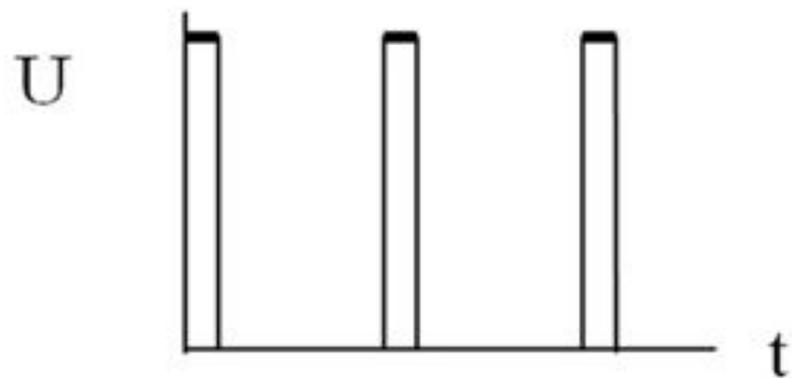
Постоянный ток

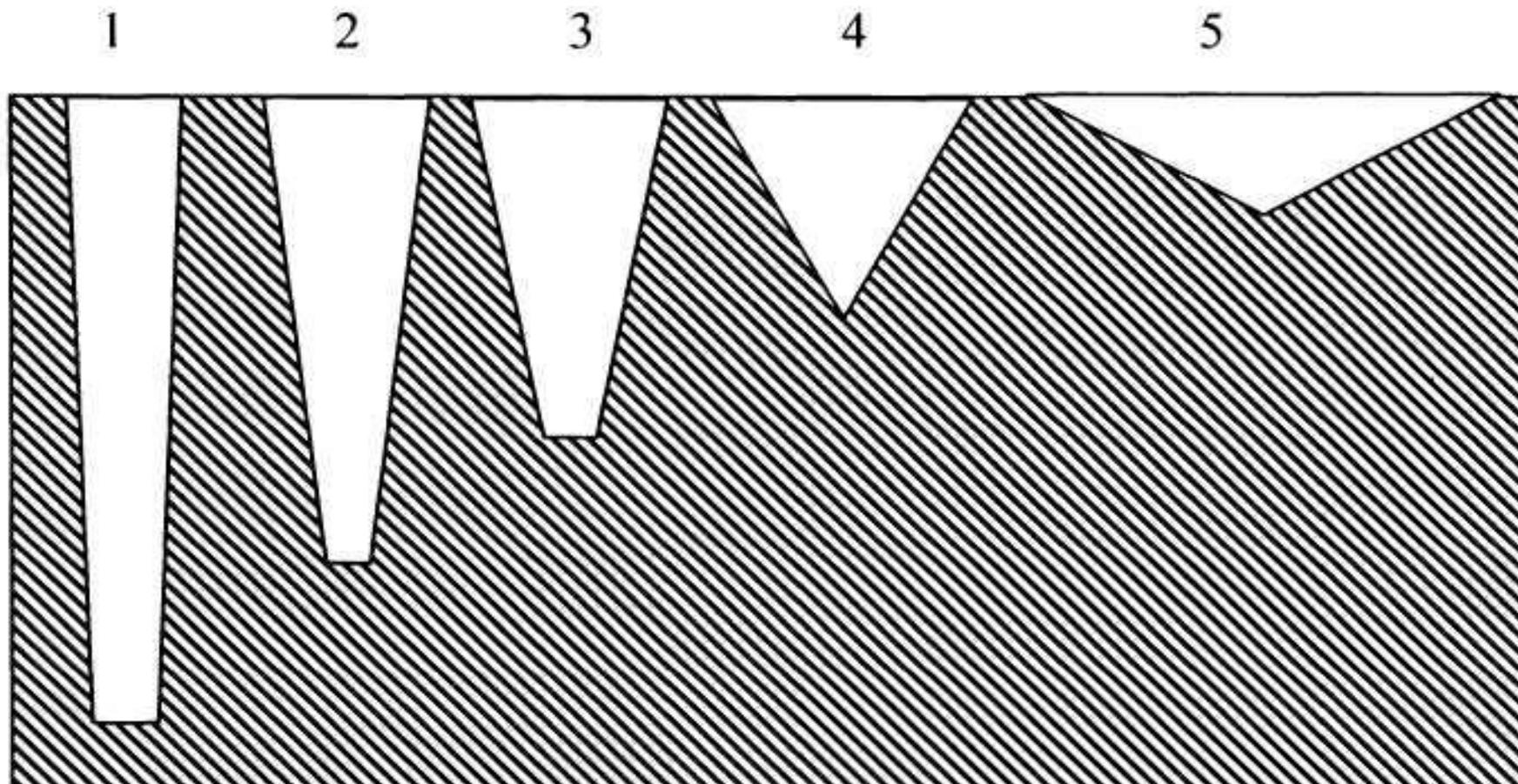


$Q=3$



$Q=5$





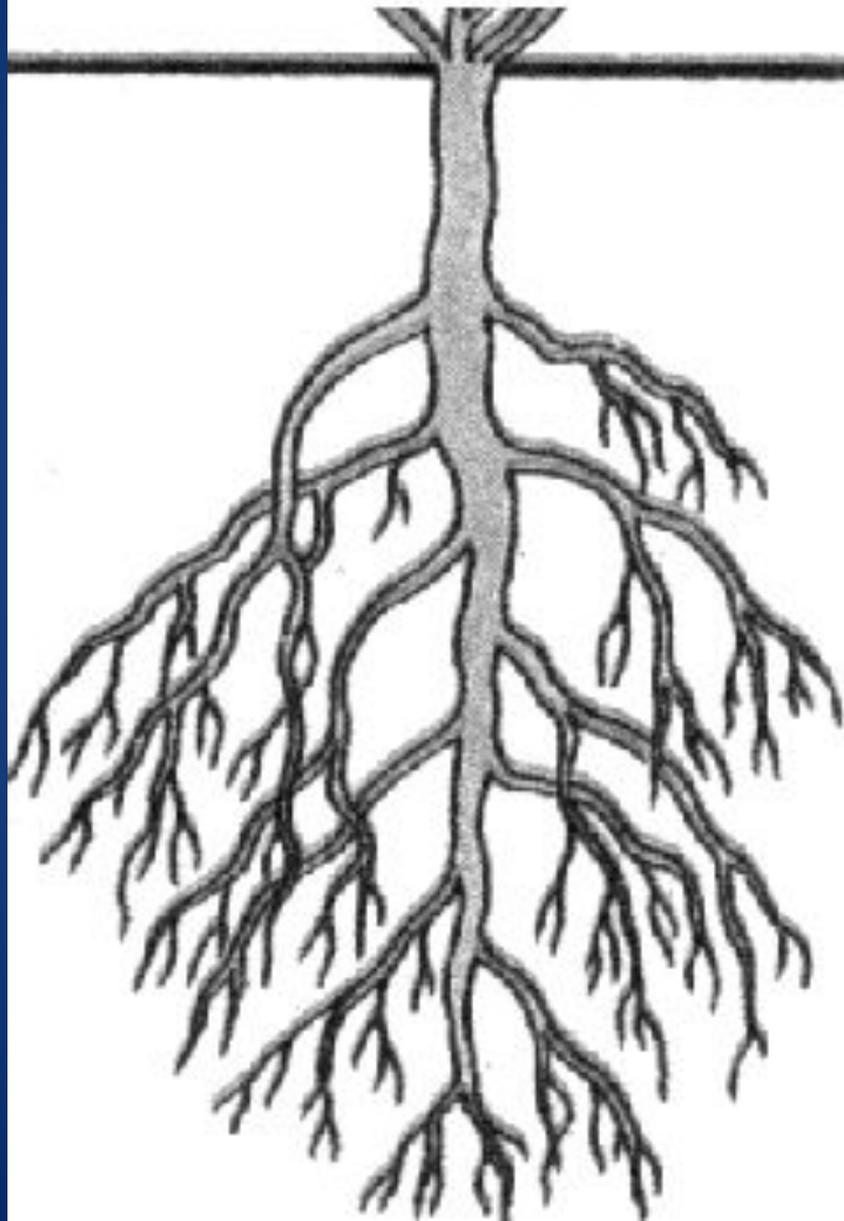
Схематическое изображение формируемой поры для фольги из алюминия в зависимости от плотности тока.

Плотность тока:

1 - 1 А/дм²; 2 - 2 А/дм²; 3 - 3 А/дм²; 4 - 4 А/дм²; 5 - 5 А/дм²

Бионический аналог

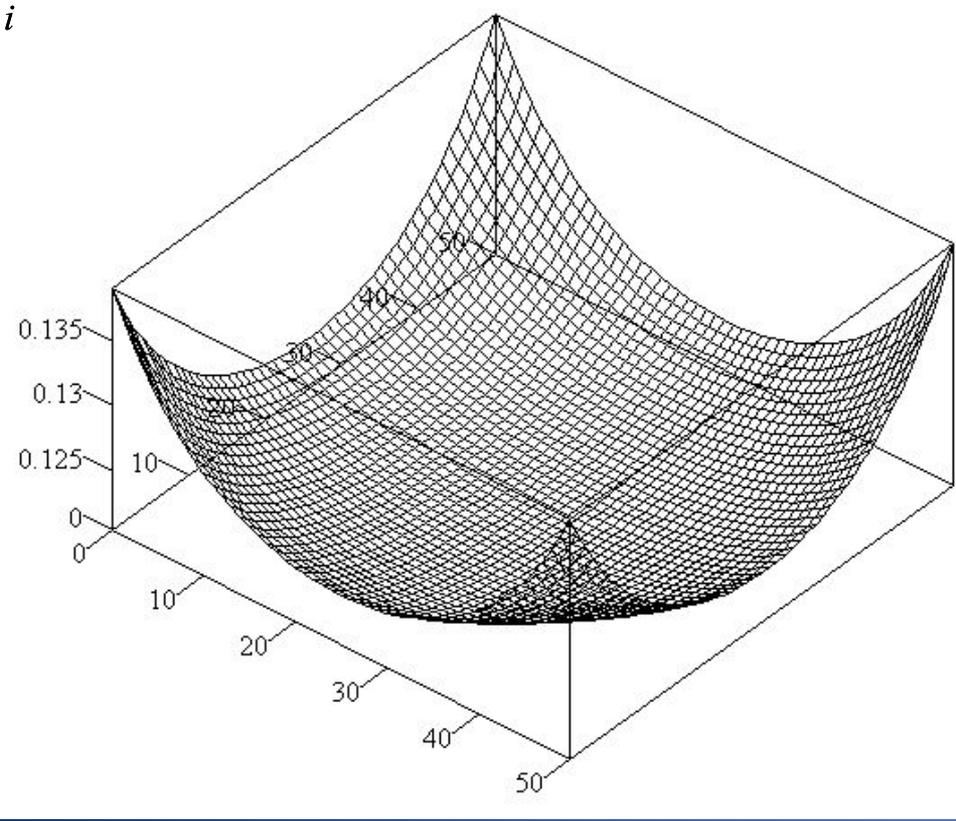
Стержневая



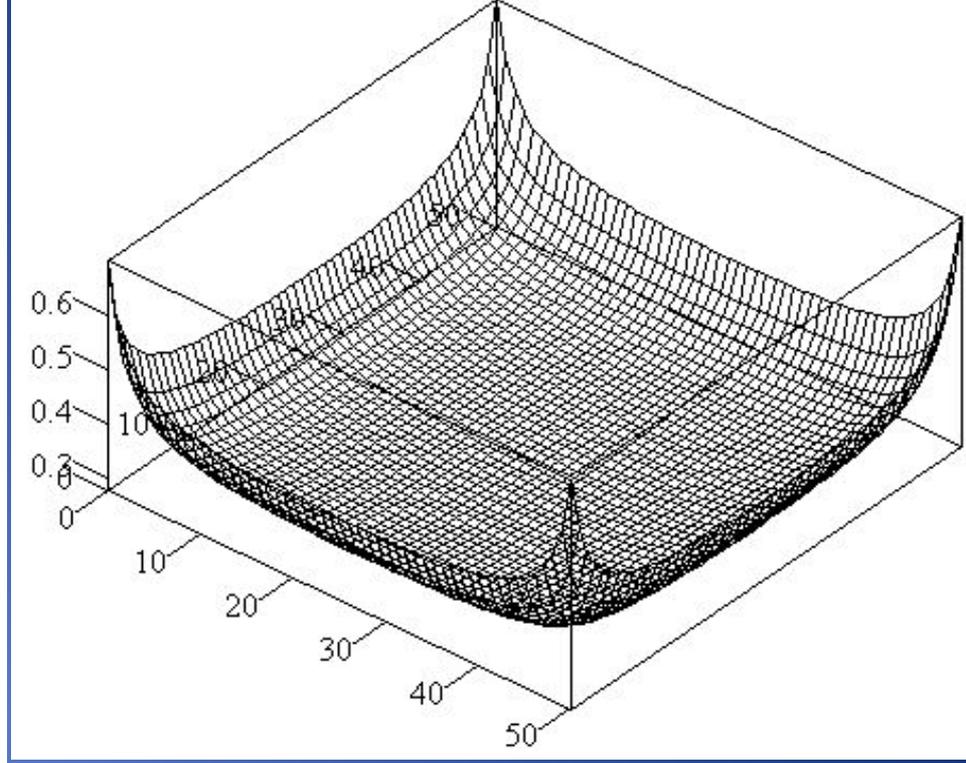
Мочковатая



i



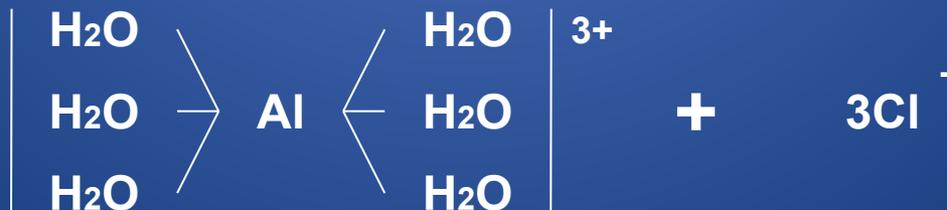
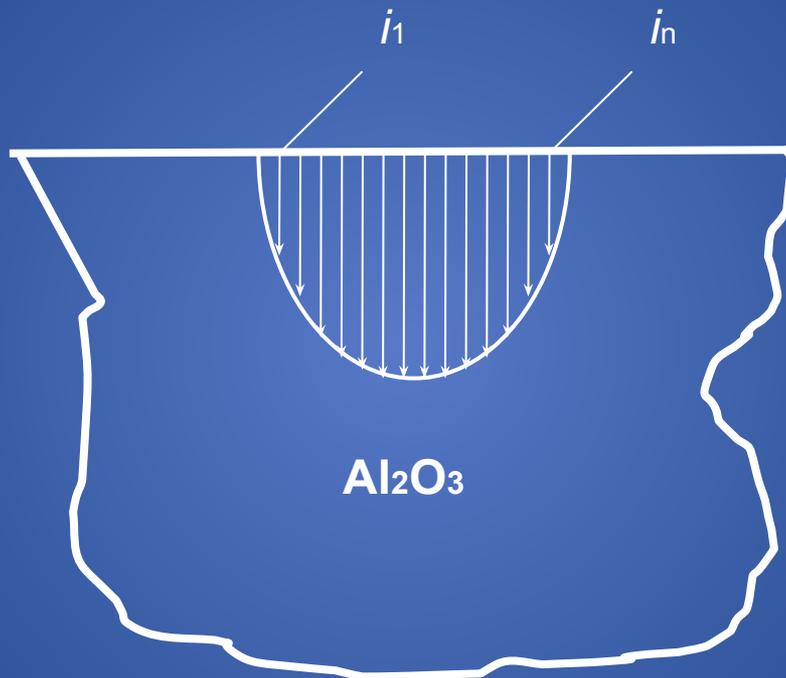
для $j = 5$ А/кв.
ДМ



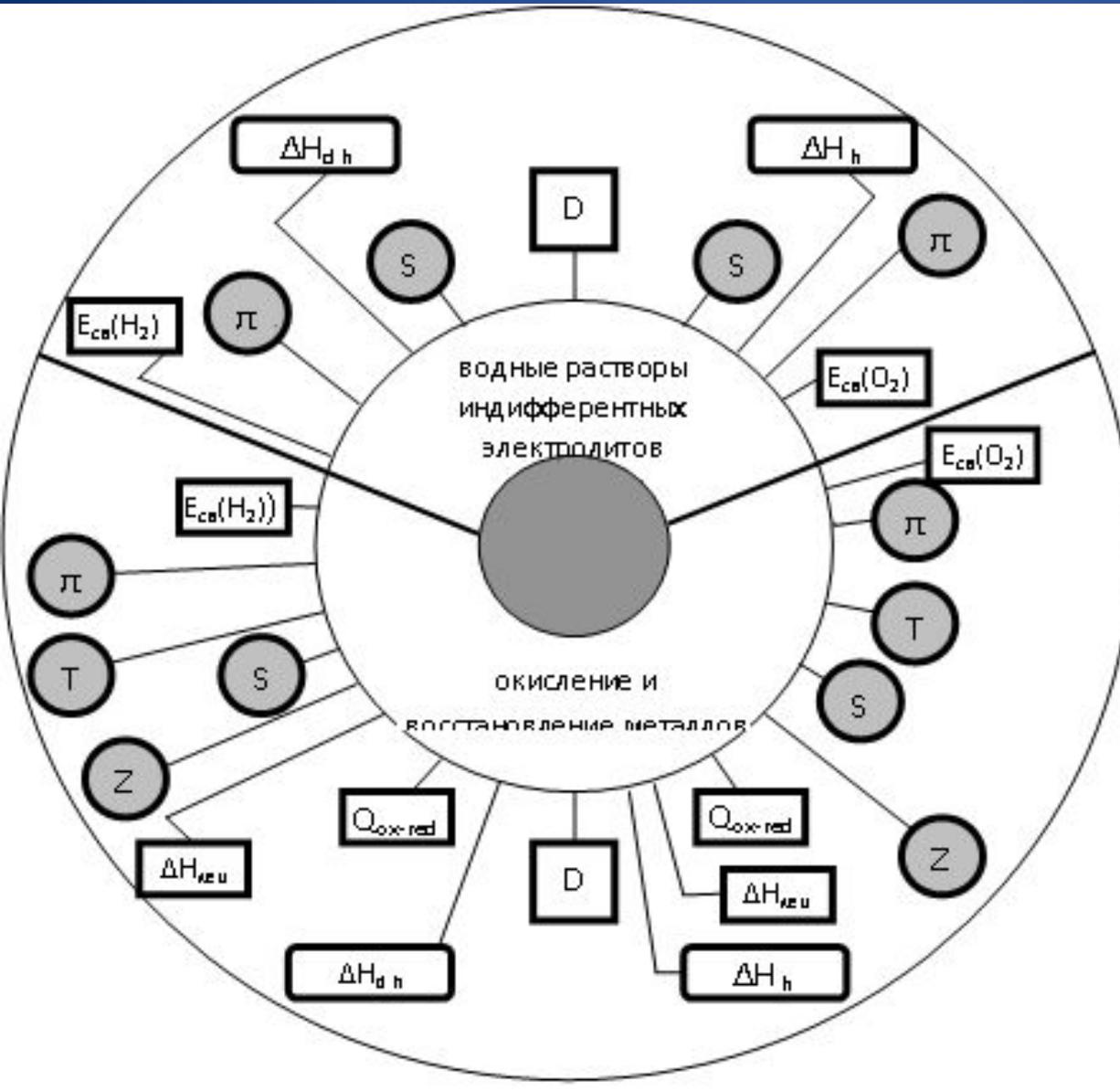
для $j = 50$ А/кв.
ДМ

Кинетика взаимодействия ионов H с оксидом алюминия

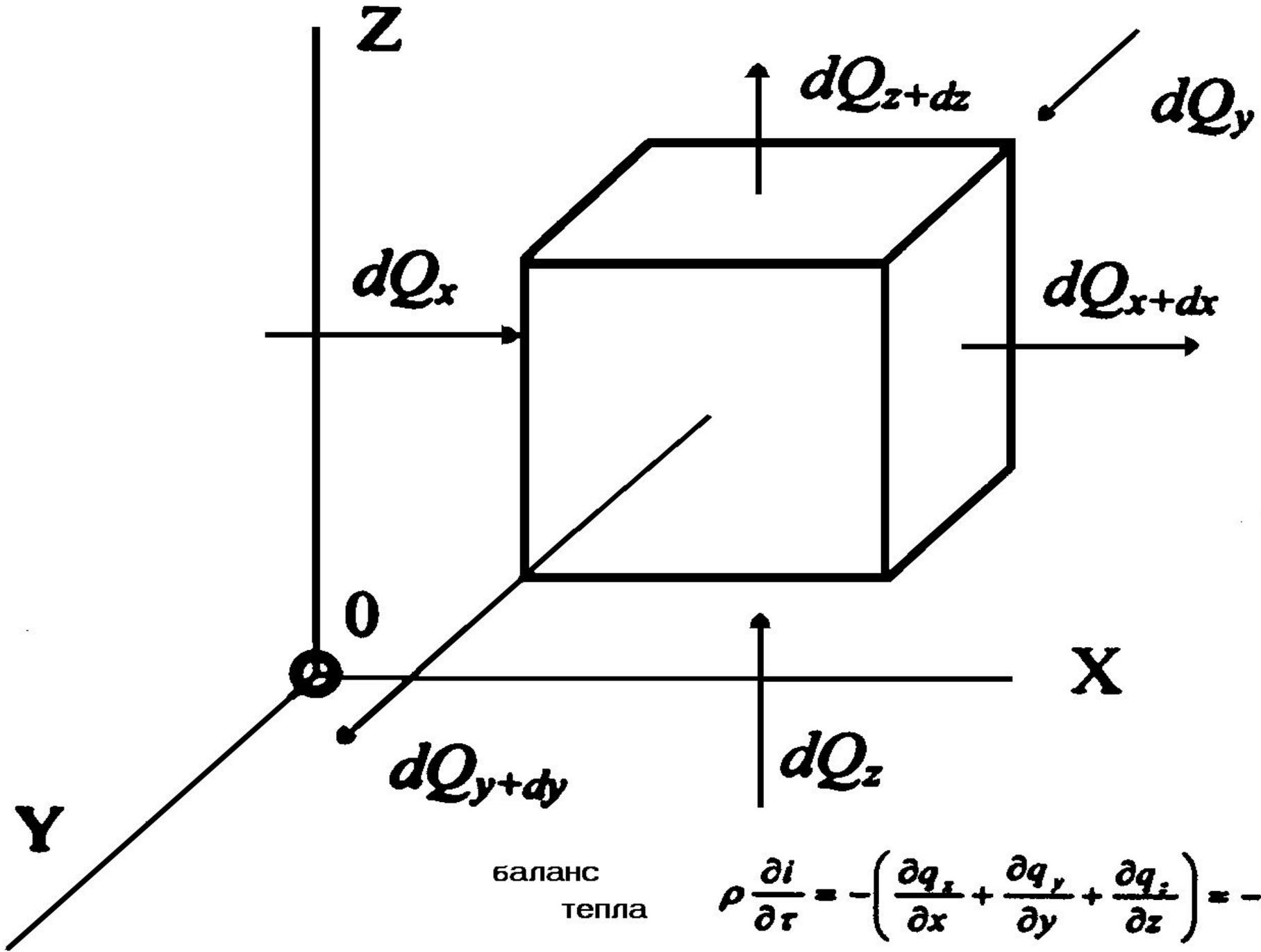
Раствор электролита



Тепловые эффекты реакций на электродах и в электролите



эффект Пельтье,
Томсона,
Зеебека, Сорэ;



баланс
тепла

$$\rho \frac{\partial i}{\partial \tau} = - \left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \right) = -\text{div } \bar{q}$$

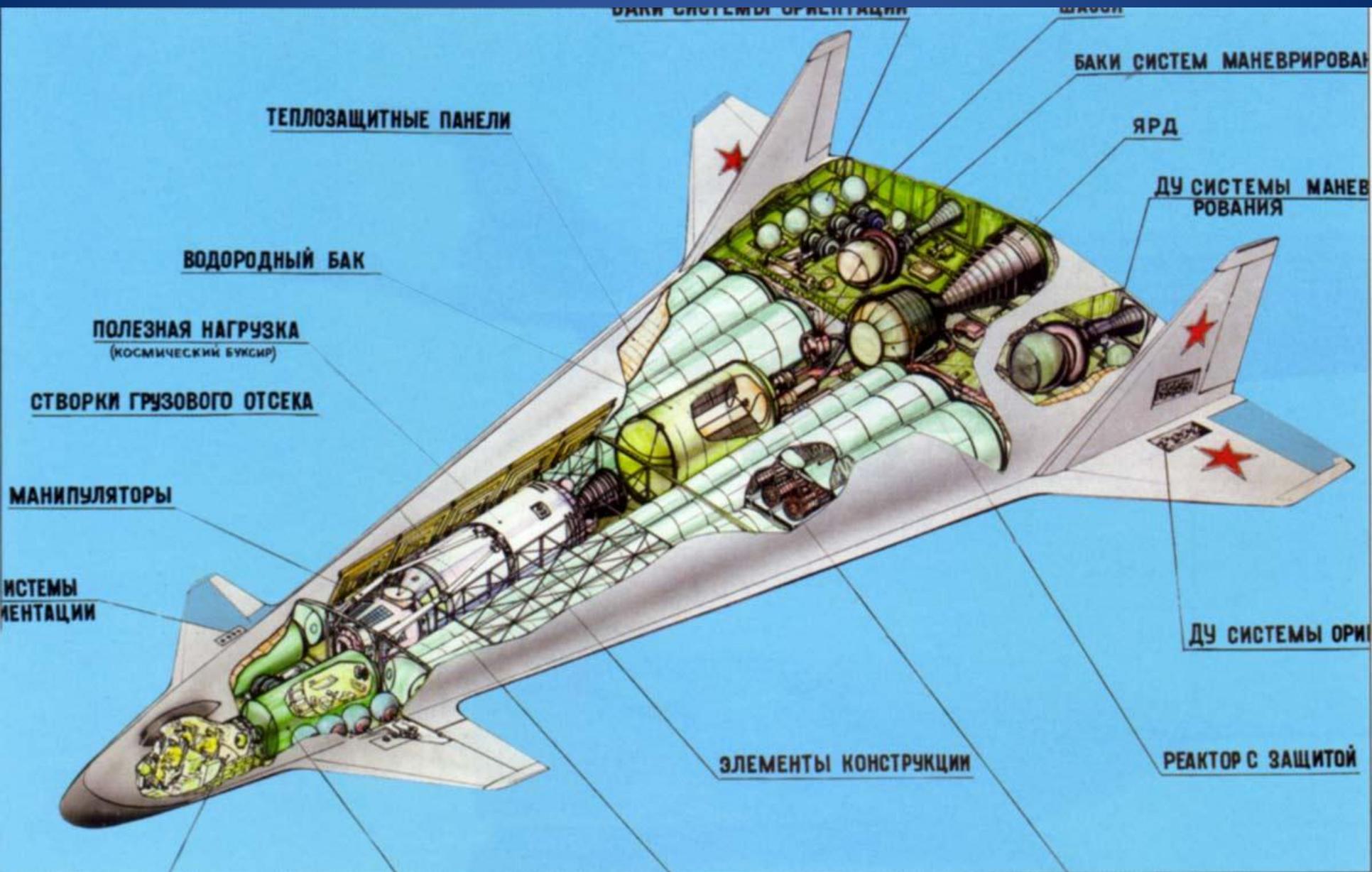
$$\frac{di}{d\tau} = \frac{\lambda}{\rho(T)} \cdot \left(\frac{\partial^2 T(i, \tau)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T(i, \tau)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T(i, \tau)}{\partial z^2} \right) -$$

$$- \omega_z \frac{\partial i}{\partial z} - \frac{1}{\rho(T)} \operatorname{div} \sum \overset{\boxtimes}{j}_i \cdot i_i$$

КОМПЛЕКС ВОДОРОДНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ



Космоплан



Спасибо за внимание

Шалимов Юрий Николаевич

д-р техн. наук, профессор

shalimov_yn@mail.ru, +7-905-053-45-73