

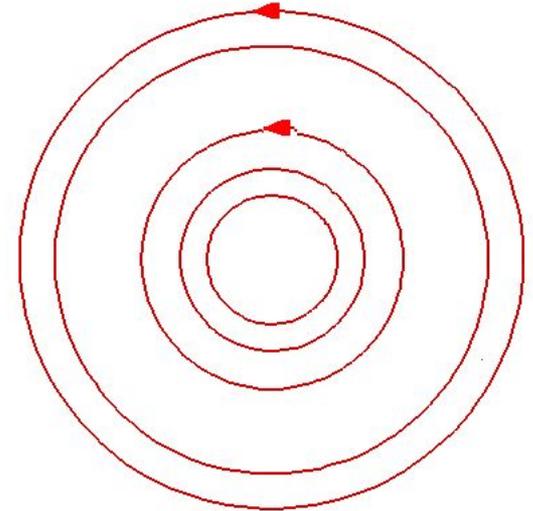
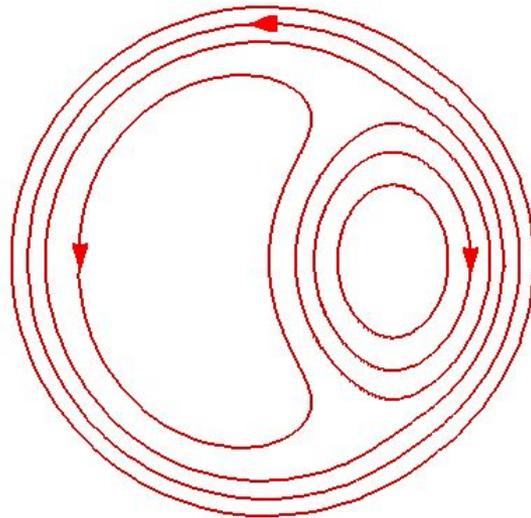
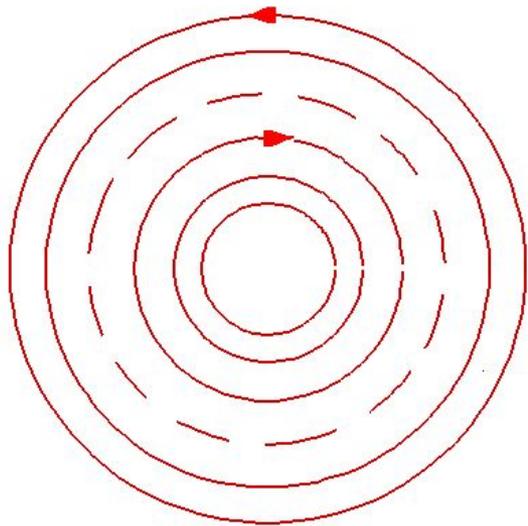
Тиринг неустойчивость в линейных открытых ловушках с электронным пучком

В.П. Жуков , *А.В. Бурдаков, И.В. Шваб

Институт вычислительных технологий СО РАН, Новосибирск, Россия,

**Институт ядерной физики СО РАН, Новосибирск, Россия*

Работа выполнена при поддержке РФФИ 04-01-00244.



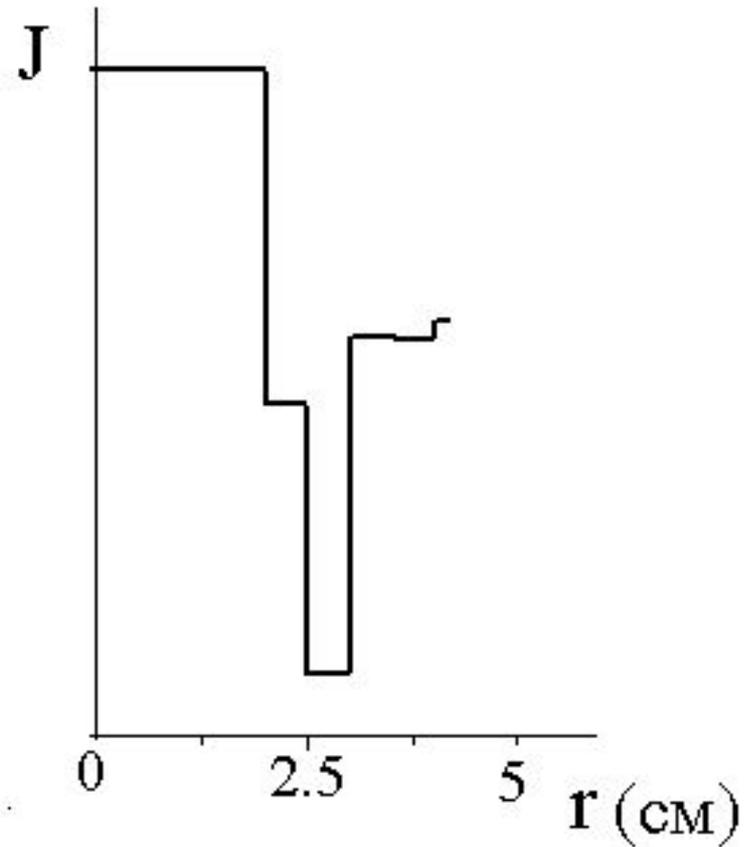
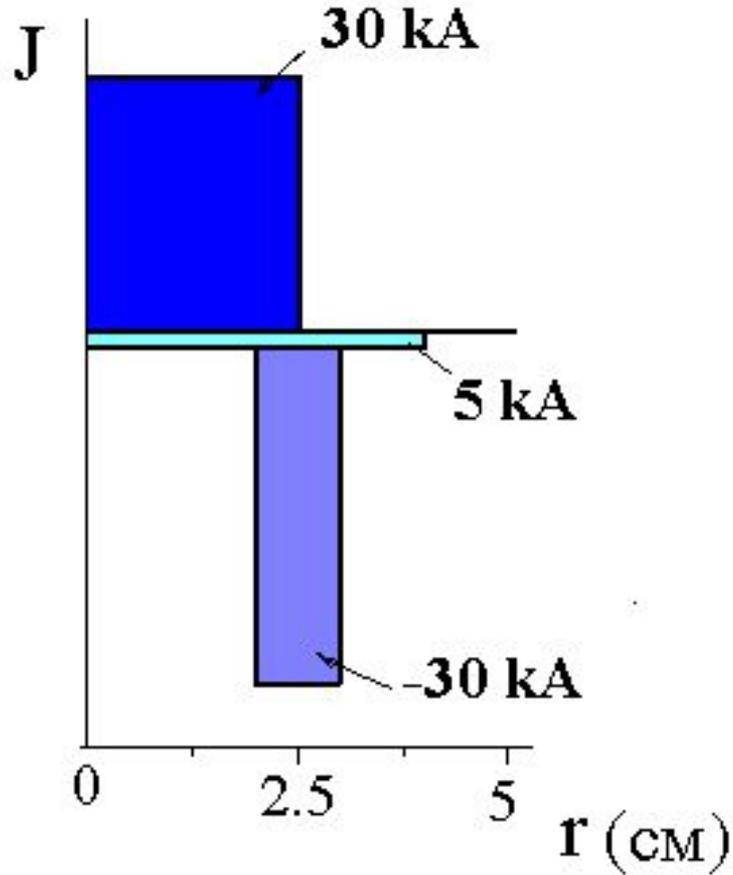
$$\frac{\partial}{\partial z} = -R^{-1} \frac{\partial}{\partial \varphi}$$

$$\varphi = z / R$$

$$R = \frac{L}{2\pi a} \frac{m}{n}$$

L - длина ловушки, a – радиус ловушки,
 m, n – номера поперечной и продольной моды

$$\vec{H}_* = \left(H_r, H_\varphi - \frac{r}{R} H_z \right)$$



Винтовые моды с $m=1$ и $n=0,1,2,3$ неустойчивы
 Наиболее неустойчива мода $m=n=1$.

Предположение:

На установке ГОЛ-3 возможно развитие тиринг неустойчивости и именно эта неустойчивость является причиной быстрого разрушения тока

Численное моделирование.

Предположения:

1. Плазма описывается уравнениями 2-х жидкостной МГД.
2. Пренебрегается гофрировкой.
3. 2-D задача. Геометрия прямого периодического цилиндра.

$$\delta H_{\text{торцов}} \boxtimes H_*$$

$$n \left(\frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} + (\mathbf{V} \nabla) \mathbf{V} \right) = [\text{rot} \mathbf{B} \times \mathbf{B}] - \nabla(p_i + p_e) + \text{div}(\hat{v}_i \partial \hat{V} / \partial \hat{x}),$$

$$\mathbf{E} = -[\mathbf{V}_e \times \mathbf{B}] + \eta \mathbf{j} - \frac{\alpha}{n} \nabla p_e + \frac{\alpha}{n} \text{div}(\hat{v}_e \partial \hat{V}_e / \partial \hat{x}),$$

$$\frac{\partial n}{\partial t} + \text{div}(n \mathbf{V}) = 0,$$

$$\frac{1}{\gamma_e - 1} \left(\frac{\partial p_e}{\partial t} + \text{div}(\mathbf{V}_e p_e) \right) = -p_e \text{div} \mathbf{V}_e + \text{div}(\chi_e \nabla T_e + \chi_{\parallel e} \mathbf{h}(\mathbf{h} \nabla T_e)) + Q_e,$$

$$\frac{1}{\gamma_i - 1} \left(\frac{\partial p_i}{\partial t} + \text{div}(\mathbf{V} p_i) \right) = -p_i \text{div} \mathbf{V} + \text{div}(\chi_i \nabla T_i + \chi_{\parallel i} \mathbf{h}(\mathbf{h} \nabla T_i)) + Q_i,$$

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = -\text{rot} \mathbf{E}, \quad \mathbf{j} = \text{rot} \mathbf{B}, \quad \mathbf{V}_e = \mathbf{V} - \frac{\alpha}{n} \mathbf{j},$$

$$\alpha = \delta_i / L, \quad \delta_i = \sqrt{m_i c^2 / (4\pi Z n_0 e^2)}$$

В качестве масштаба длины выбран характерный масштаб течения L , магнитного поля – характерное поле B_0 , концентрации – характерная концентрация электронов n_0 , плотности – $\rho_0 \equiv n_0 m_i / Z$, скорости – скорость Альвена $V_A = B_0 / (4\pi \rho_0)^{1/2}$, времени – альвеновское время $t_A = L / V_A$, давления – $B_0^2 / (4\pi)$, электрического поля – $V_A B_0 / c$, температуры – $B_0^2 / (4\pi n_0)$, плотности тока – $c B_0 / (4\pi L)$.

$$\frac{\partial}{\partial z} = -R^{-1} \frac{\partial}{\partial \varphi} \quad R = \frac{L}{2\pi a} \frac{m}{n}$$

$$H_* = \left(\frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial \varphi}, -\frac{\partial \psi}{\partial r} \right)$$

Начальные данные:

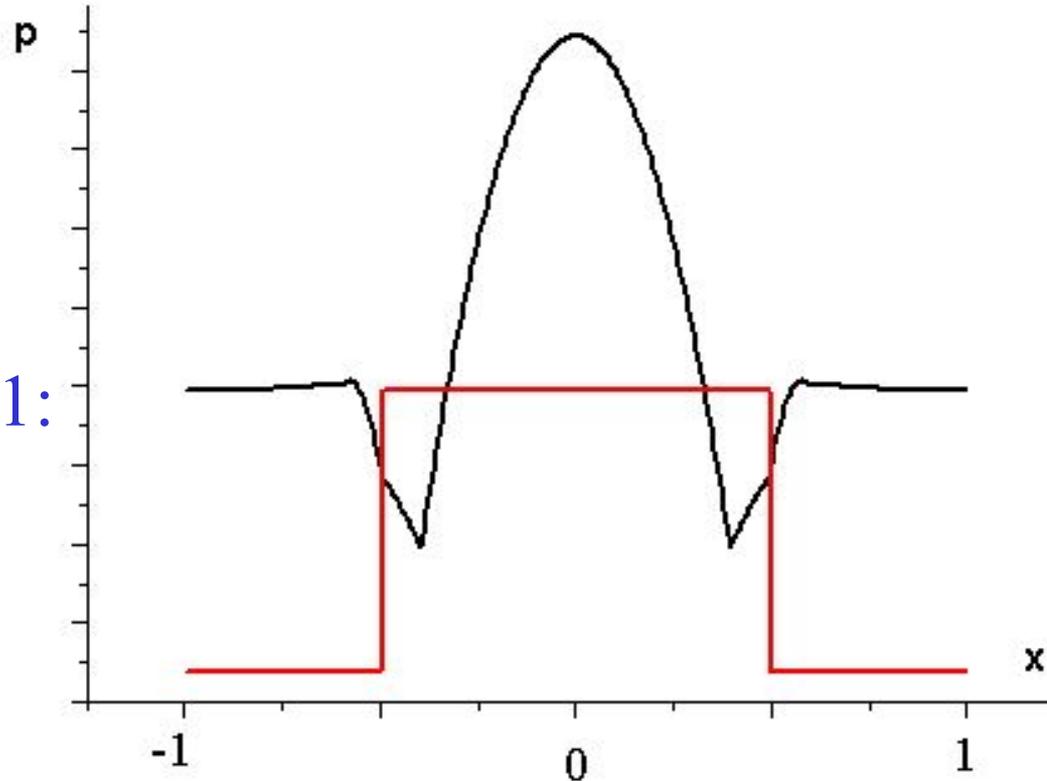
$$H_z = const, \quad \rho = const$$

1. ρ - находится из условия равновесия
2. ρ - “ступенька”

Граничные условия при $r=1$:

$$\psi = const, \quad \nabla V = 0$$

$$T_e = const, \quad T_i = const$$



$$n_0 = 10^{15} \text{ cm}^{-3} \quad T_e = T_i = 100 \text{ eV} \quad H_{0z} = 50 \text{ kGs}$$

$$a \neq 5 \quad M = 12 \quad \text{Мода } m = n = 1$$

$$\alpha = 0.145 \quad U_A = 348 \cdot 10^8 \text{ cm/s} \quad / \quad t_{eq} = 1.44 \cdot 10^{-8} \text{ s}$$

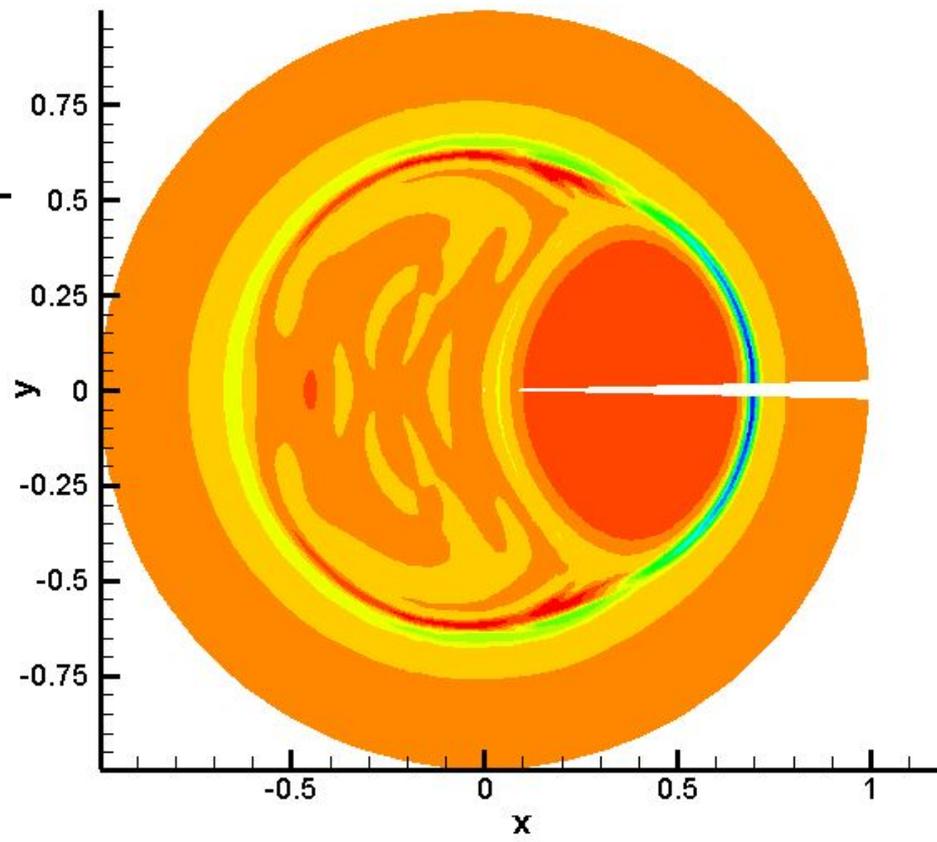
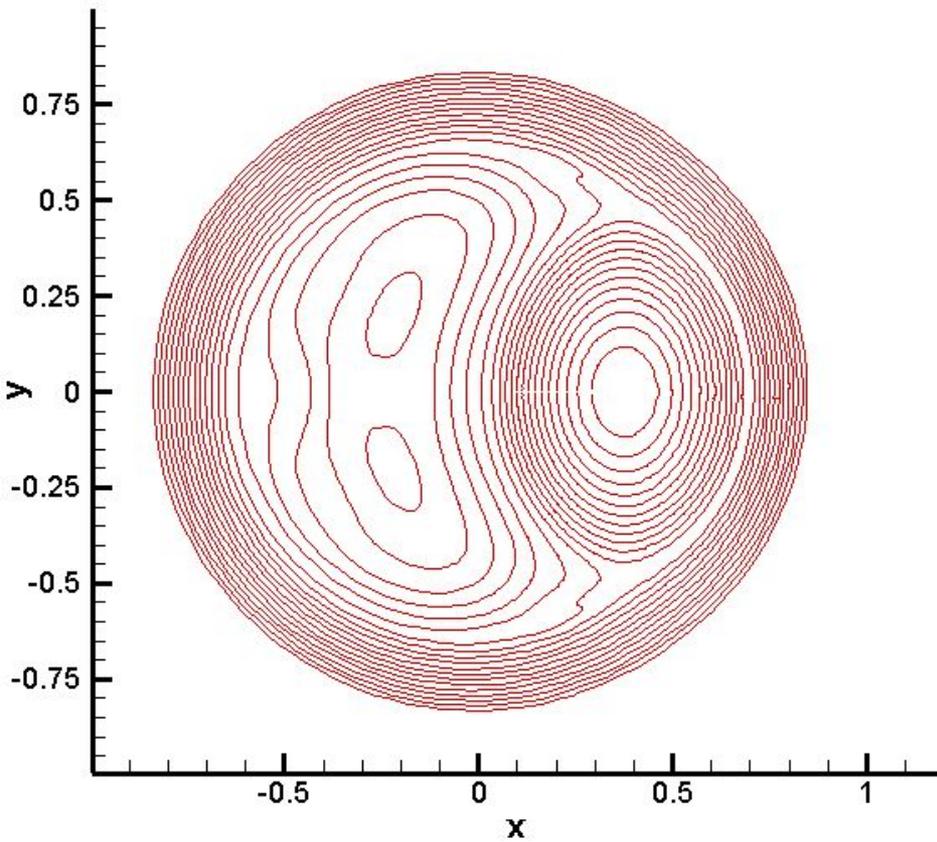
η, χ соответствуют Кулоновским значениям

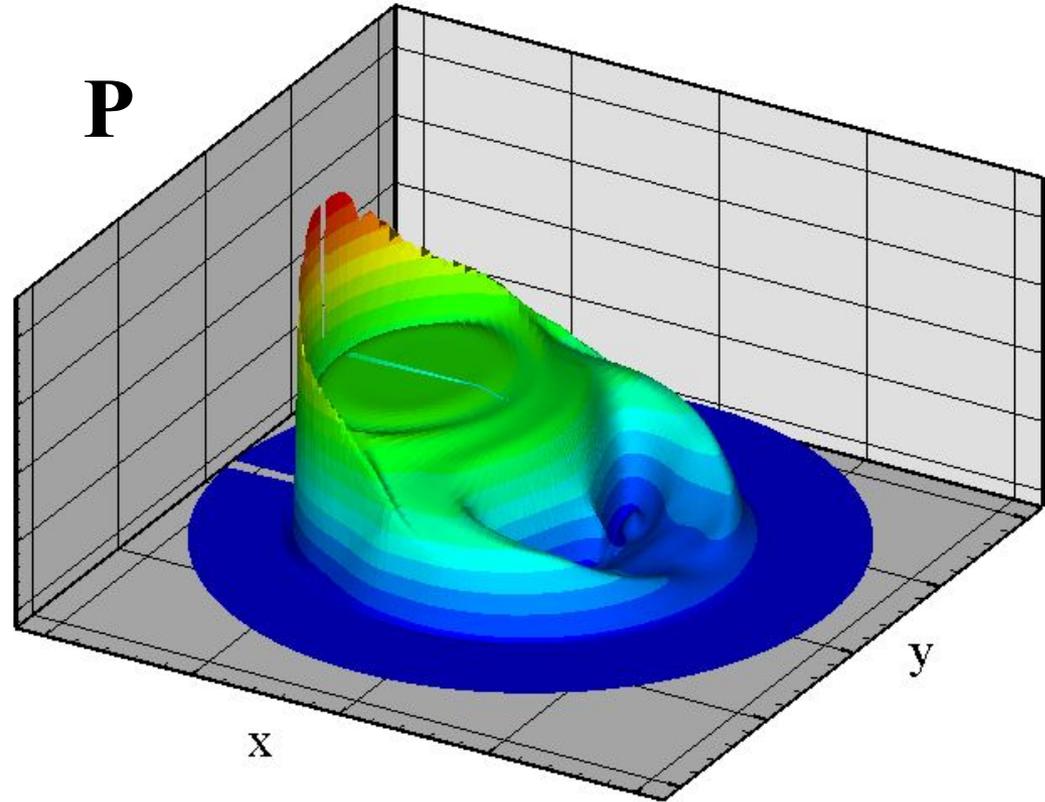
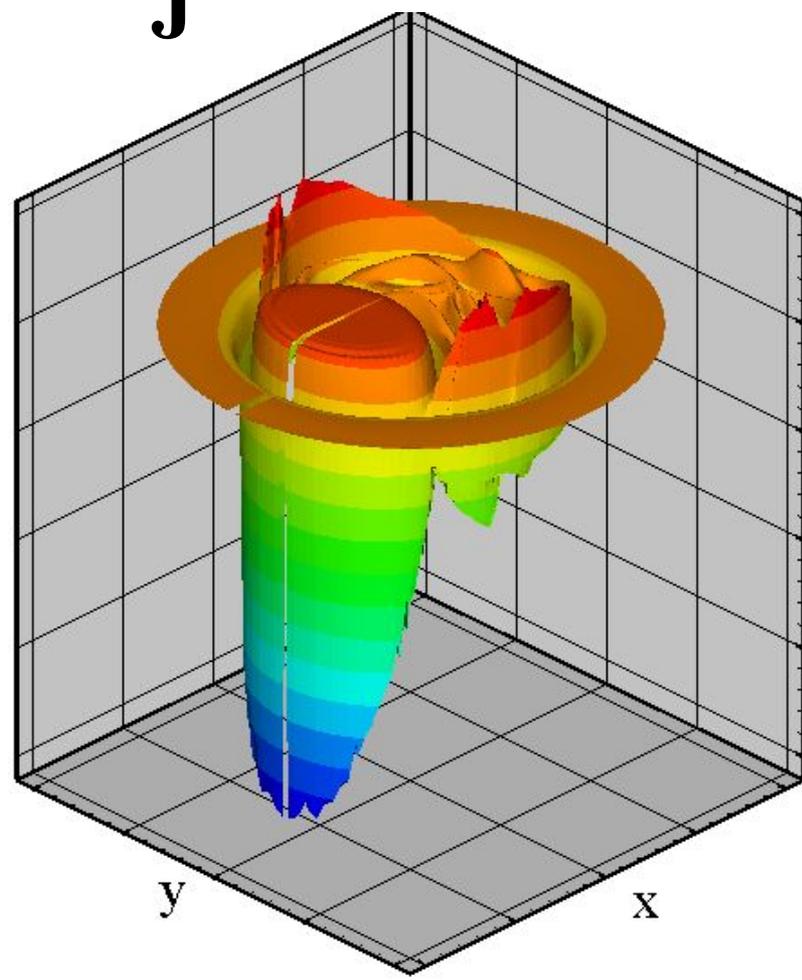
Безразмерные значения равны:

$$\eta = 4.5 \cdot 10^{-6} \quad \chi_{\parallel e} = 8.92 \quad \chi_{\perp e} = 2.23 \cdot 10^{-8}$$
$$\chi_{\parallel i} = 0.36 \quad \chi_{\perp i} = 2.85 \cdot 10^{-7}$$

$$\beta = \frac{n_0 T_e}{\rho_0 V_A^2} \approx 7.9 \cdot 10^{-4}$$

$\alpha = 0$

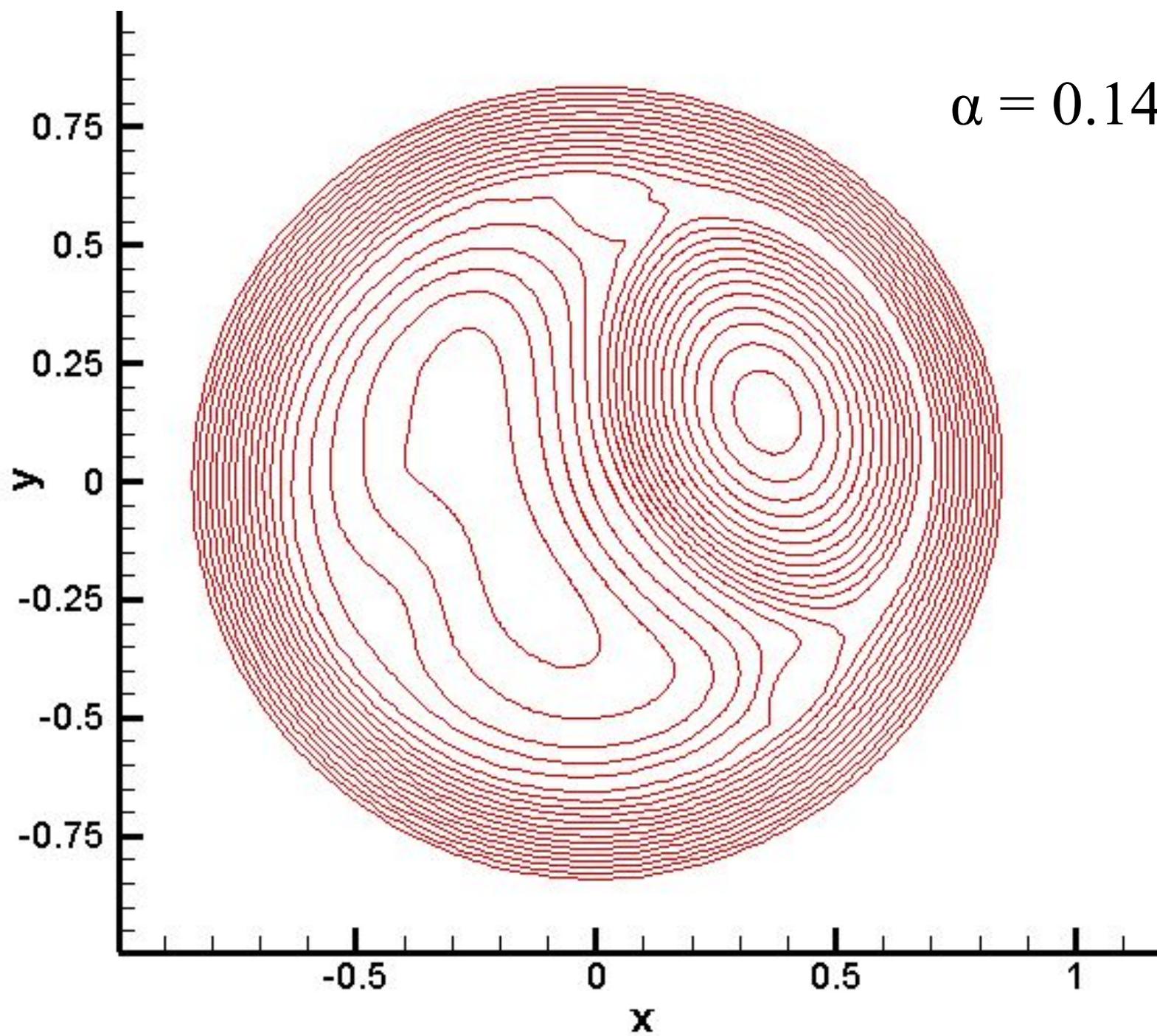


P**J**

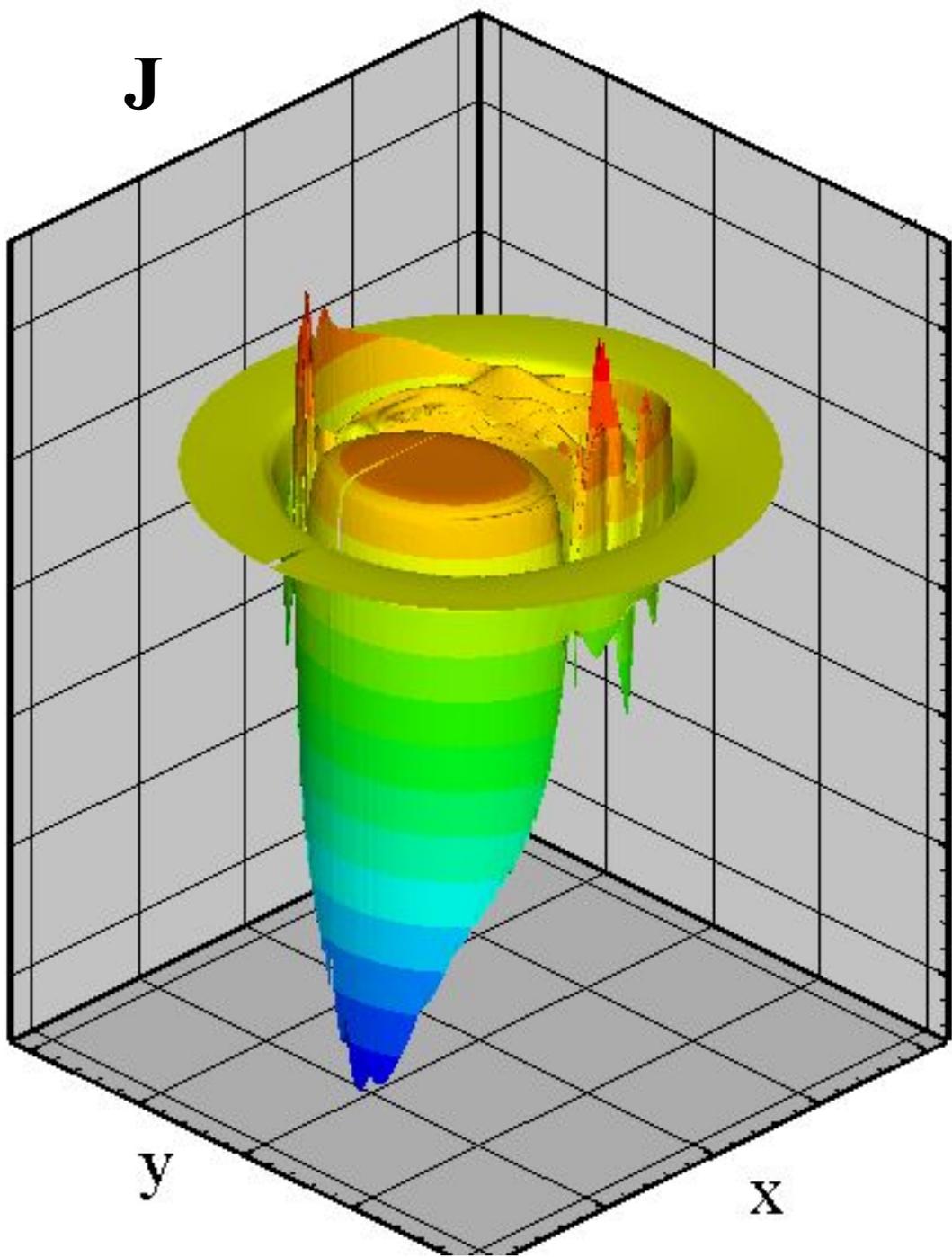
- Уничтожение внутреннего потока
- Разрушение тока
- Сброс тепловой энергии на периферию ,
но не на стенку (внутренняя мода)
- $t_{ек}_{нелин} \approx 7 \cdot 10^{-6}$

что совпадает с экспериментом

$\alpha = 0.145$



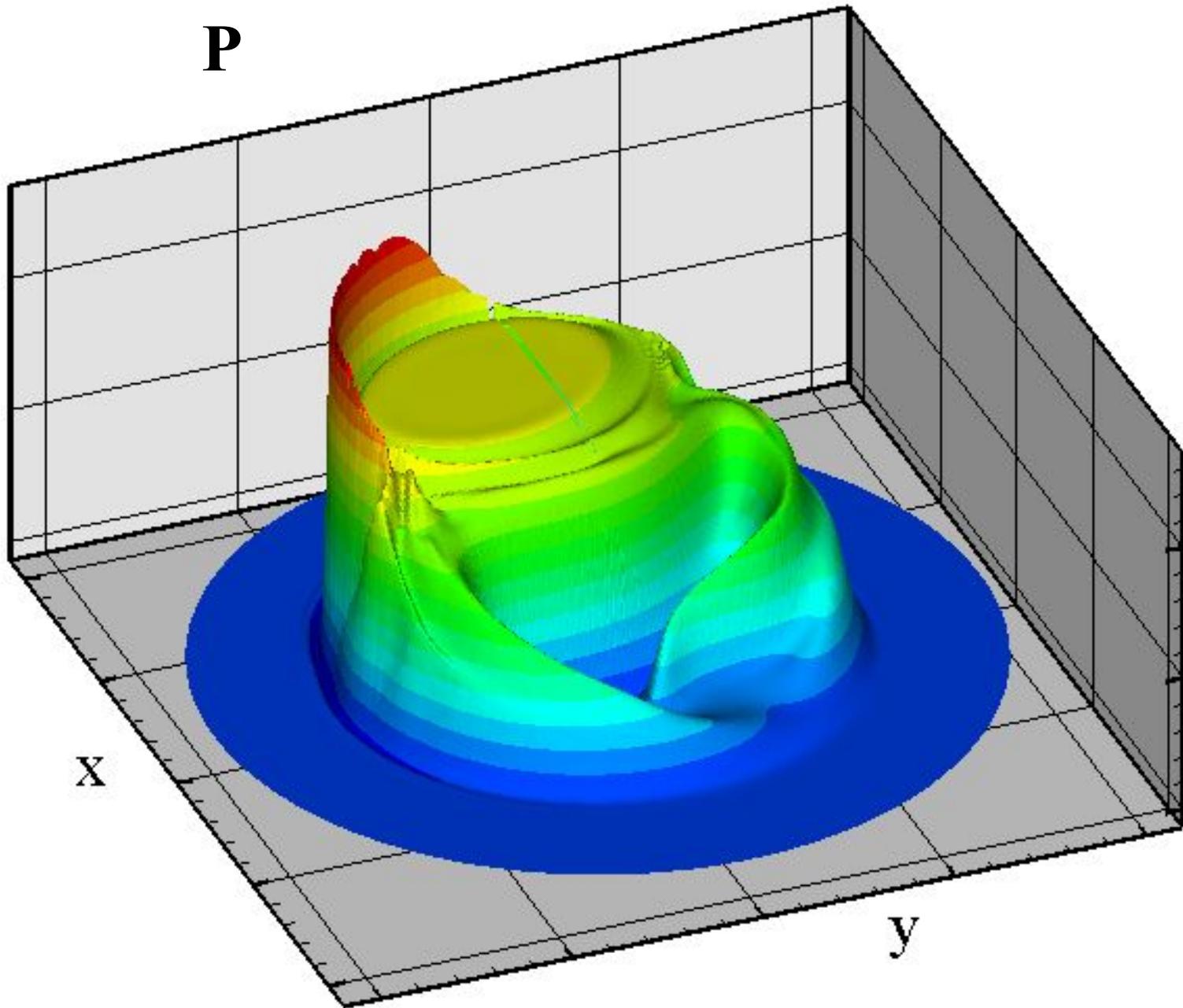
J



y

x

P



Заключение:

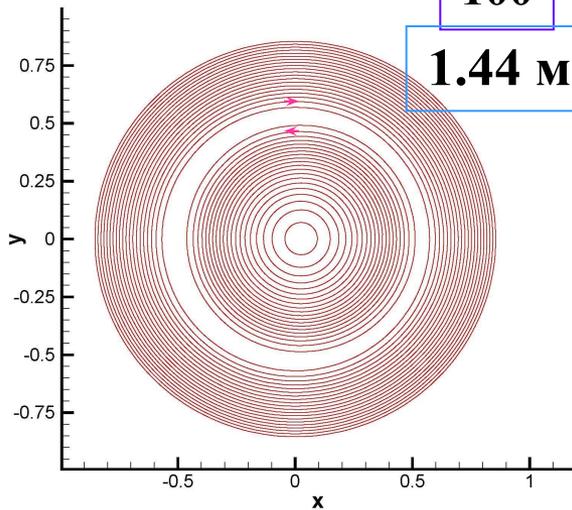
Тиринг неустойчивость может иметь место и играть важную роль в динамике плазмы в открытых линейных ловушках с электронным пучком или с продольными токами.

Винтовая структура магнитного поля

Frame 001 | 26 Oct 2004 |

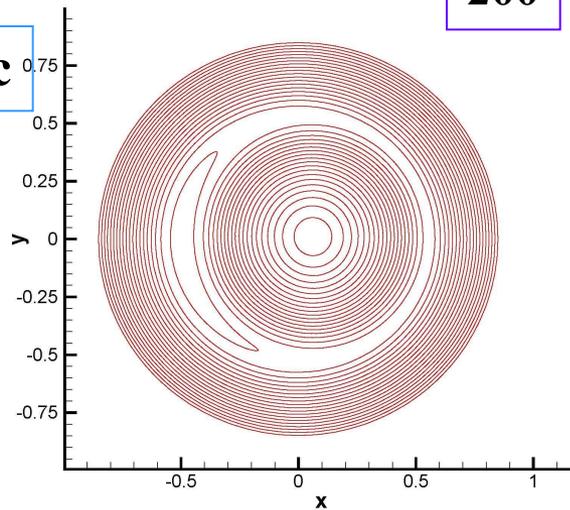
100

1.44 мкс



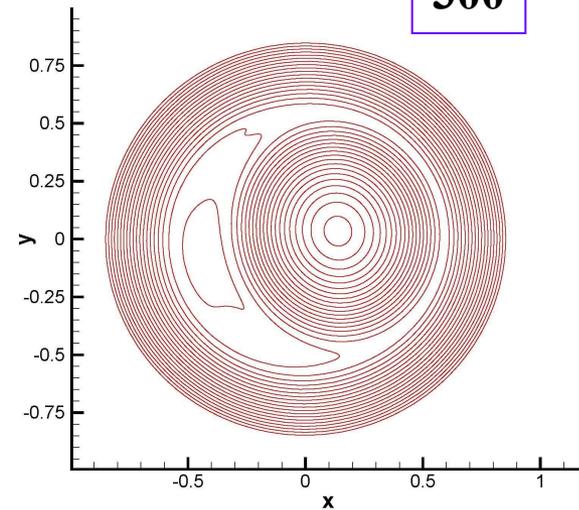
Frame 001 | 26 Oct 2004 |

200



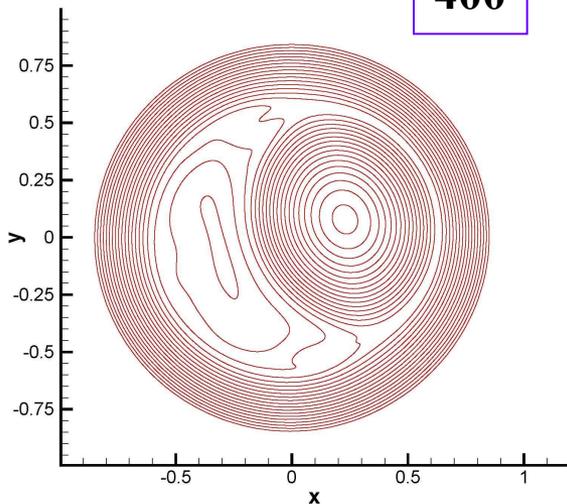
Frame 001 | 27 Oct 2004 |

300



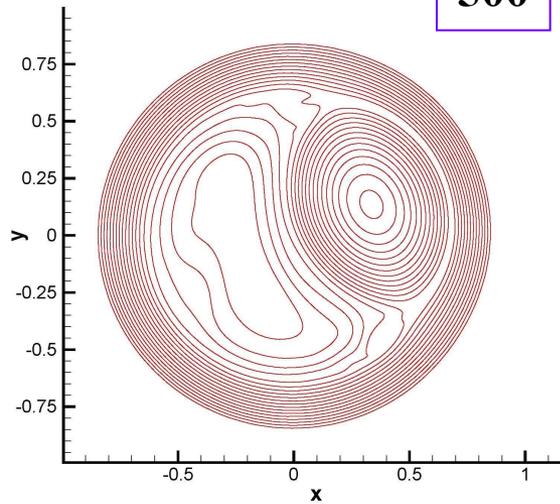
Frame 001 | 27 Oct 2004 |

400



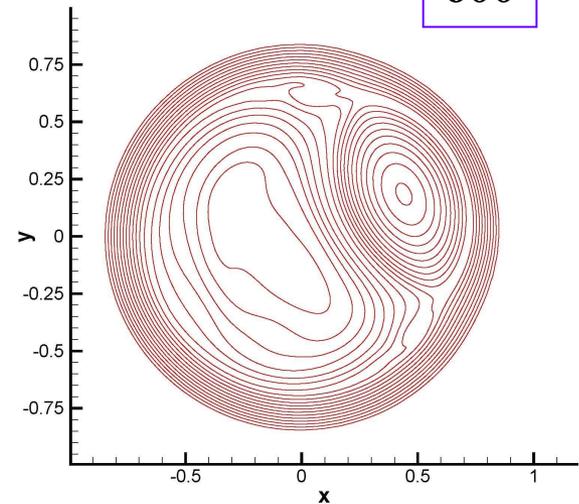
Frame 001 | 25 Nov 2004 |

500

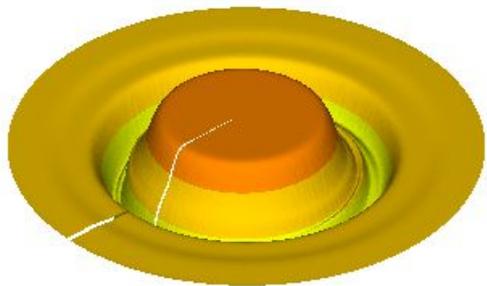


Frame 001 | 25 Nov 2004 |

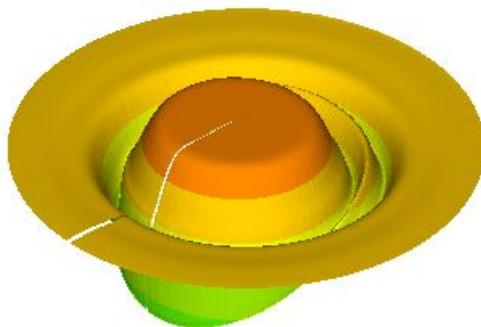
600



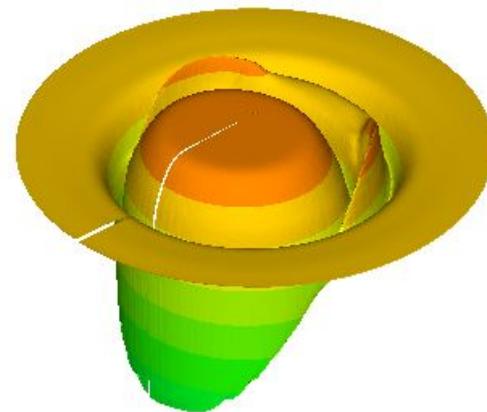
100



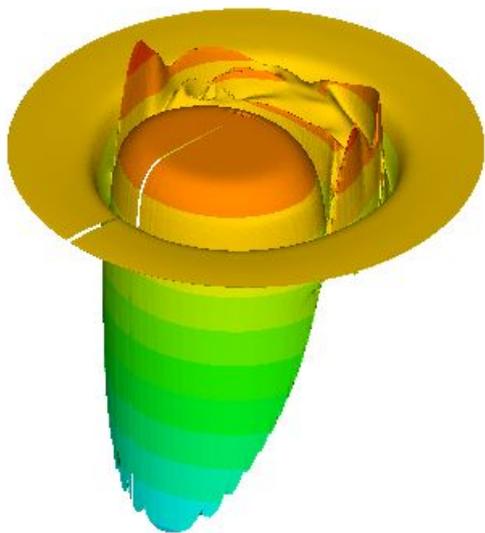
200



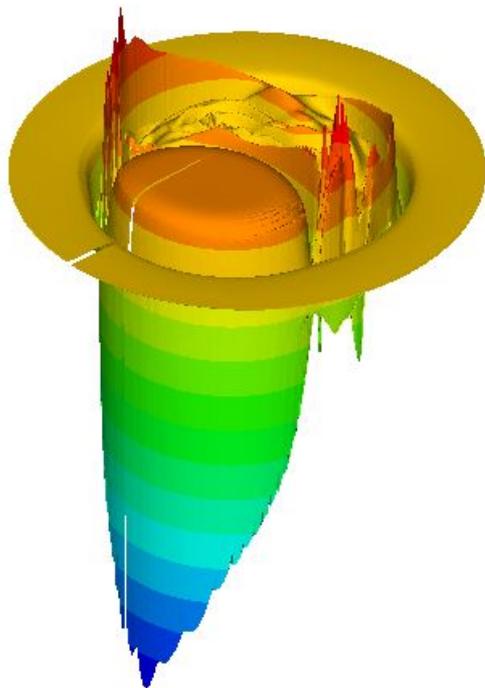
300



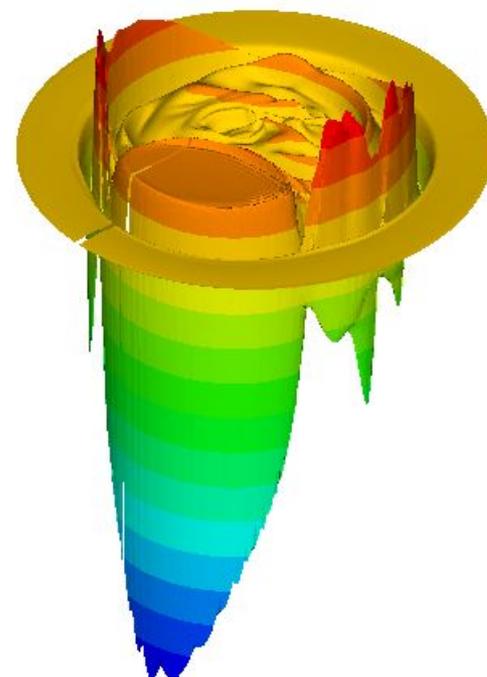
400



500



600



100

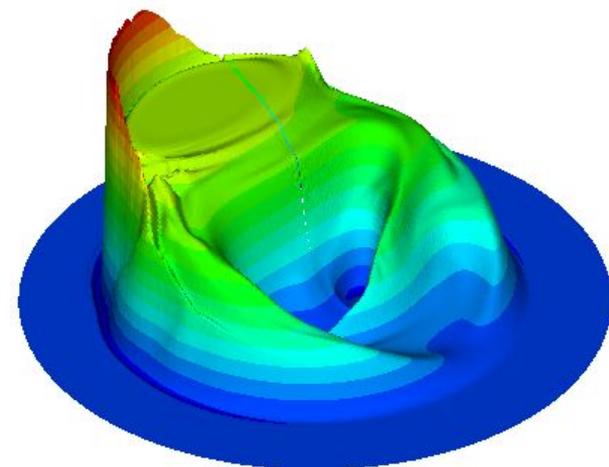
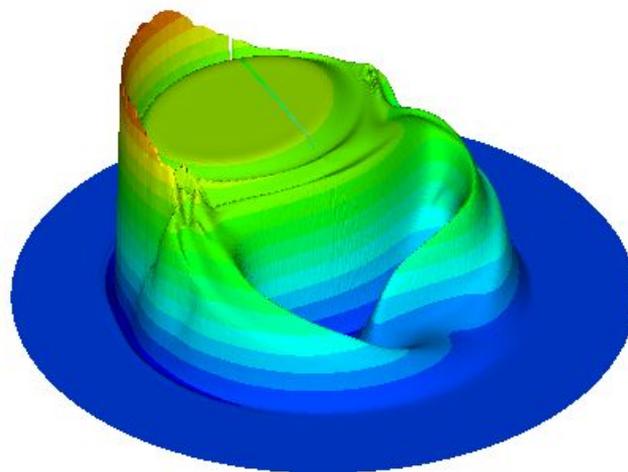
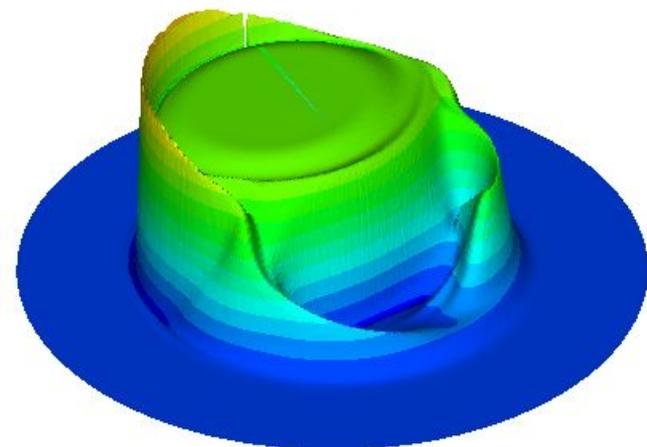
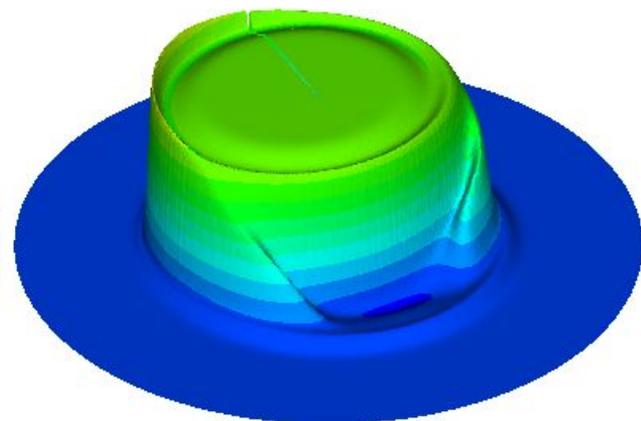
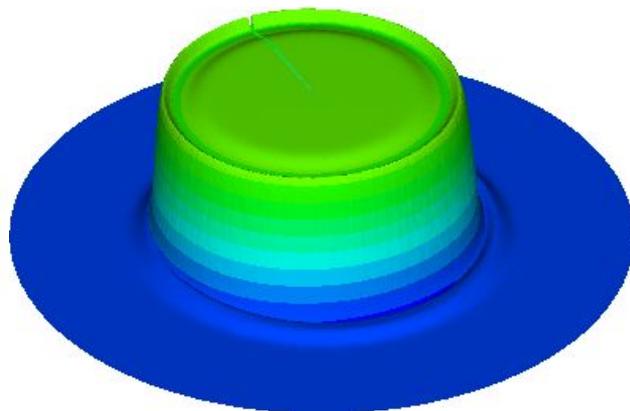
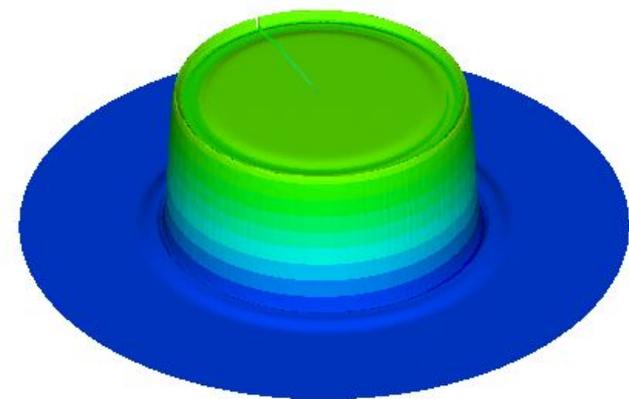
200

300

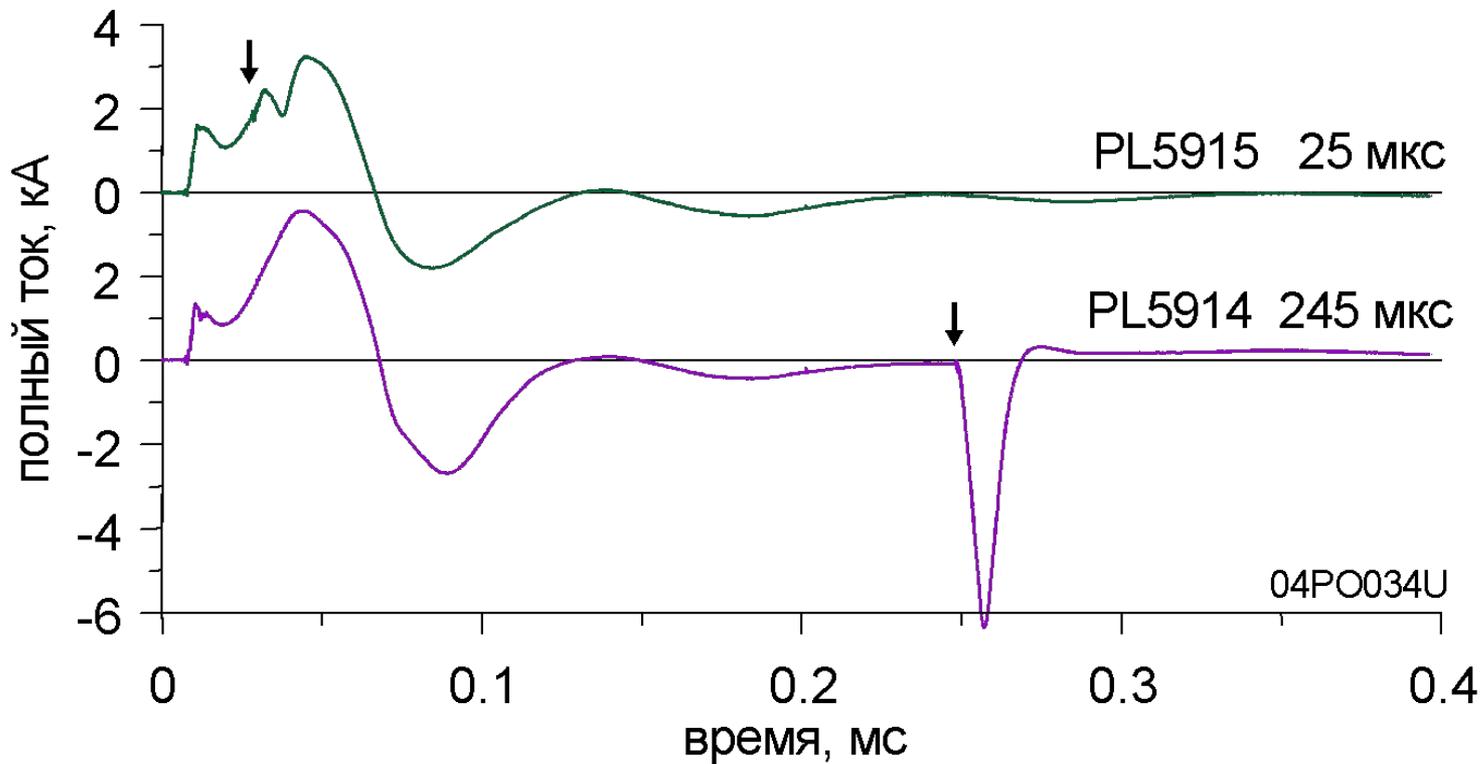
400

500

600



Влияние профиля q на удержание плазмы



$$\mu = \frac{1}{q} = \frac{LB_{\phi}}{2\pi r B_z}$$

