

Определение стойкости индуктора с градиентным электрическим сопротивлением при генерации сильных импульсных магнитных полей

Докладчик: П. А. Русских

Соавторы: Г. Ш. Болтачев, С. Н. Паранин

ВВЕДЕНИЕ

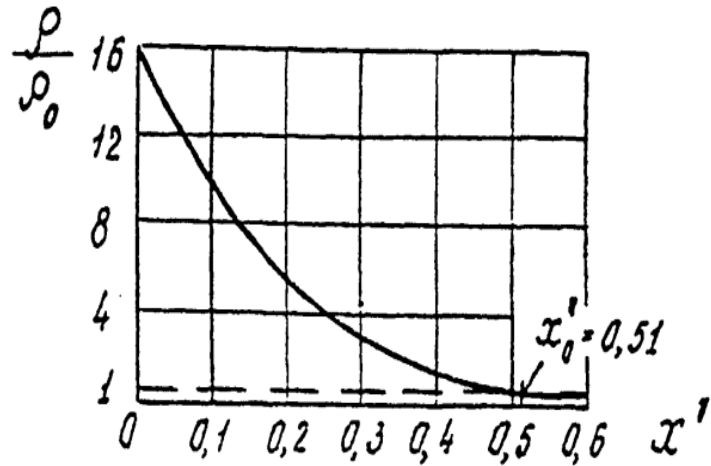


Трещина на поверхности
индуктора



Полное разрушение

Расчёты, проведённые ранее



$$B_e(t) = B_0 \cdot \exp(t/t_0)$$

$$\Delta q(x, t) = \frac{B_e^2(t)}{\mu_0} \cdot \frac{\overbrace{1}^{\chi}}{[\sqrt{\ln(\rho_1/\rho_0)} + 1]^2}$$

Exam.: $\rho_1/\rho_0 = 5 \rightarrow \chi = 0.194$

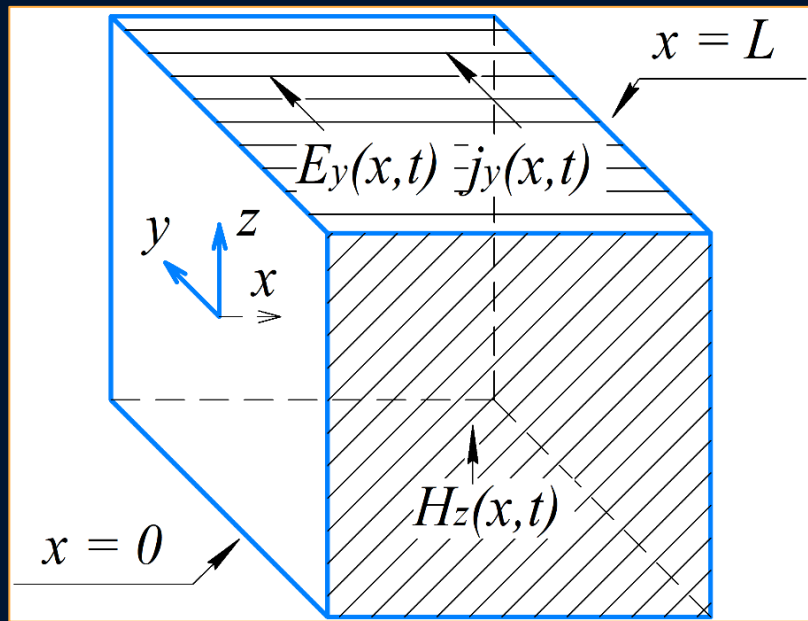
G.A. Shneerson, Fields and transients in equipment superstrong currents.
Leningrad: Energoizdat Publ., 1981.

Цель: выявить влияние высокорезистивного слоя на стойкость стали 30ХГСА в сильных магнитных полях.

Задачи:

- Составить модель и выбрать критерий разрушения;
- Выделить параметры материала оказывающие наибольшее влияние;
- Проанализировать профили удельного сопротивления и определить наилучший.

Модель и граничные условия



Граничные условия В:

$$B_0(t) = B_m \exp\left(-\frac{t}{T_e}\right) \sin\left(\frac{2\pi t}{T_s}\right), \quad B_{x=L}^n = 0$$

B_m – амплитуда, T_e – параметр затухания, T_s – период синусоиды

Граничные условия для Т:

$$\left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)_{x=0}^n = 0, \quad T_{x=L}^n = 0$$

Уравнение диффузии магнитного поля

$$\rho \cdot \frac{\partial^2 B}{\partial x^2} + \frac{\partial \rho}{\partial x} \cdot \frac{\partial B}{\partial x} - \mu \cdot \frac{\partial B}{\partial t} = 0$$

ρ – удельное сопротивление, μ – магнитная постоянная.

Уравнение теплопроводности

$$c_v \frac{\partial T}{\partial t} = \sigma_n \frac{\partial}{\partial t} \varepsilon_n + \frac{\rho(x, T)}{\mu^2} \left(\frac{\partial B}{\partial x} \right)^2 + \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}$$

c_v – объёмная теплоёмкость, σ_n – нормальные напряжения, ε_n – нормальные деформации, λ – коэффициент теплопроводности.

Профили сопротивления

$$\frac{\rho}{\rho_{bulk}} = \gamma(x, T) = \gamma_e(x) + \alpha T,$$

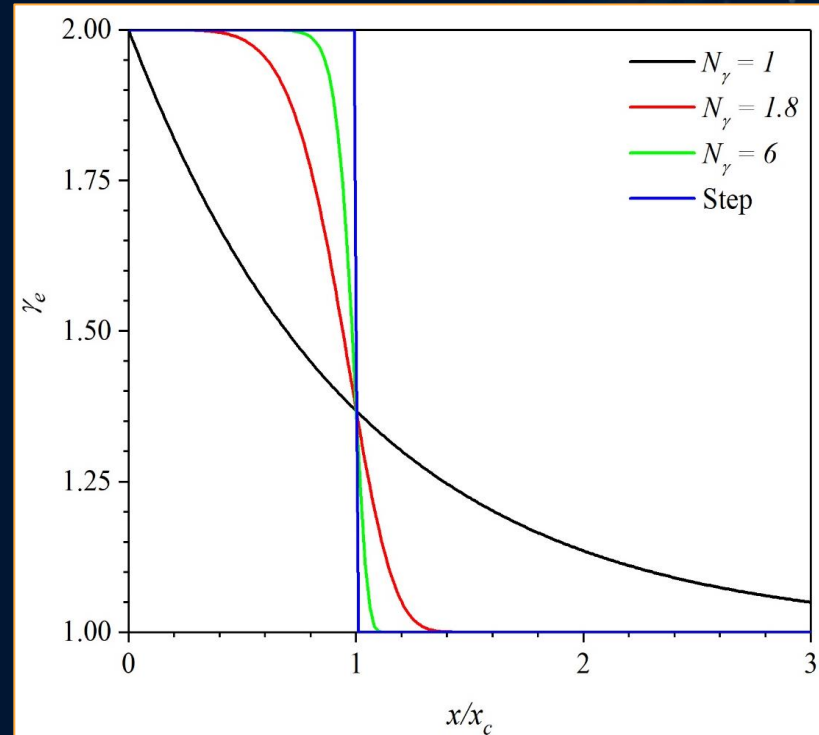
где α – температурный коэффициент сопротивления.

Для плавного профиля:

$$\gamma_e(x) = 1 + \gamma_{00} \exp \left[- \left(\frac{x}{x_c} \right)^{N_\gamma} \right].$$

Для ступенчатого профиля:

$$\begin{cases} \gamma_e(x) = 1 + \gamma_0, & x < x_c, \\ \gamma_e(x) = 1 + \frac{\gamma_0}{2}, & x = x_c, \\ \gamma_e(x) = 1, & x > x_c. \end{cases}$$



Напряжения и деформации

Действие силы Ампера: $f_a = -\frac{1}{\mu_0} B \frac{\partial B}{\partial x} = -\frac{\partial \sigma_n}{\partial x}$

Закон Гука для тангенциальных напряжений и упругих деформаций $\varepsilon_n^{(e)}$

$$\frac{d\sigma_t}{E} = \frac{\nu}{1-\nu} \frac{d\sigma_n}{E} - \frac{\beta_\nu}{1-\nu} dT$$

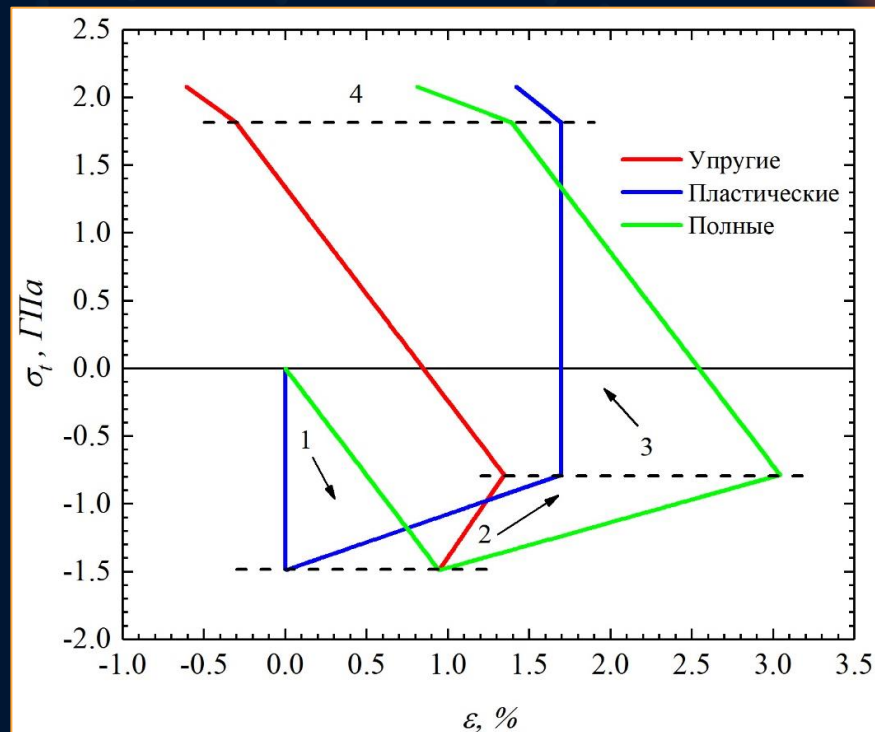
$$d\varepsilon_n^{(e)} = \frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{1-\nu} \frac{d\sigma_n}{E} + \frac{1+\nu}{1-\nu} \beta_\nu dT$$

Критерий Мизеса для предела прочности аппроксимированного линейной зависимостью.

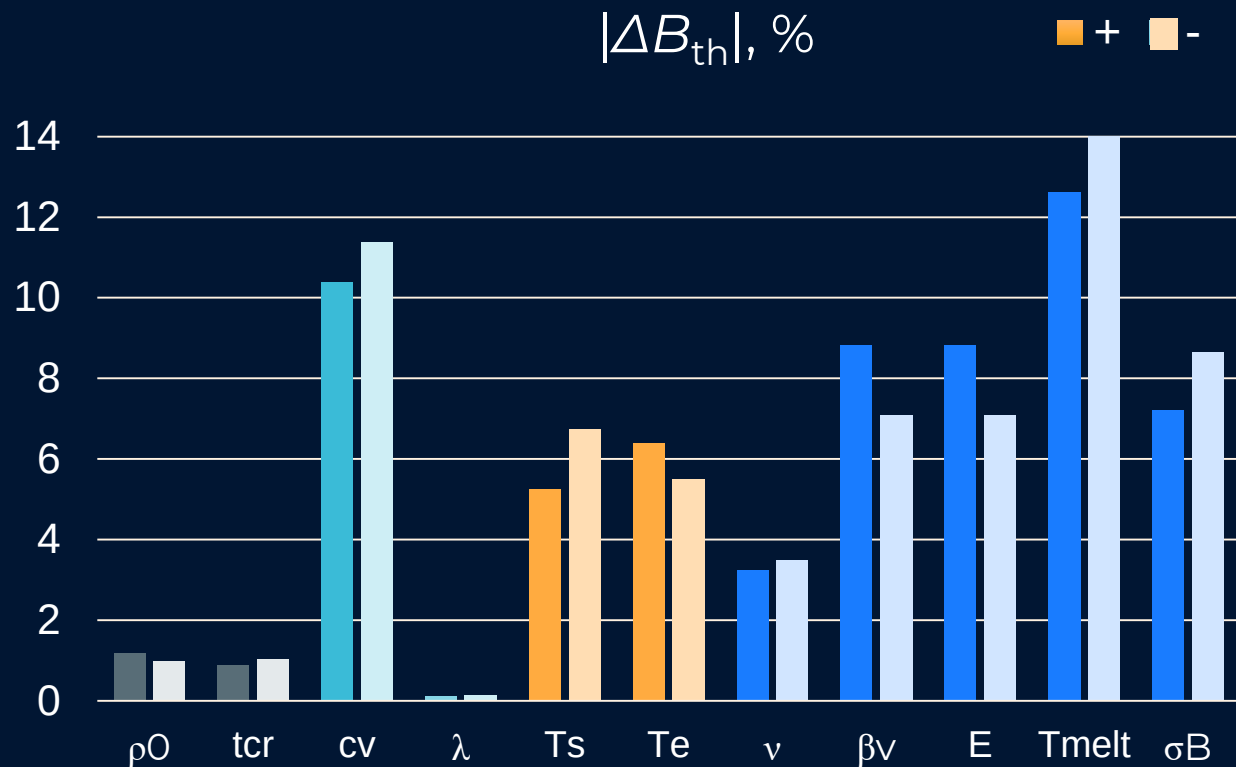
$$|\sigma_n - \sigma_t| = \sqrt{3} \sigma_{b,1} (T - T_{melt})$$

Выбор критерия разрушения

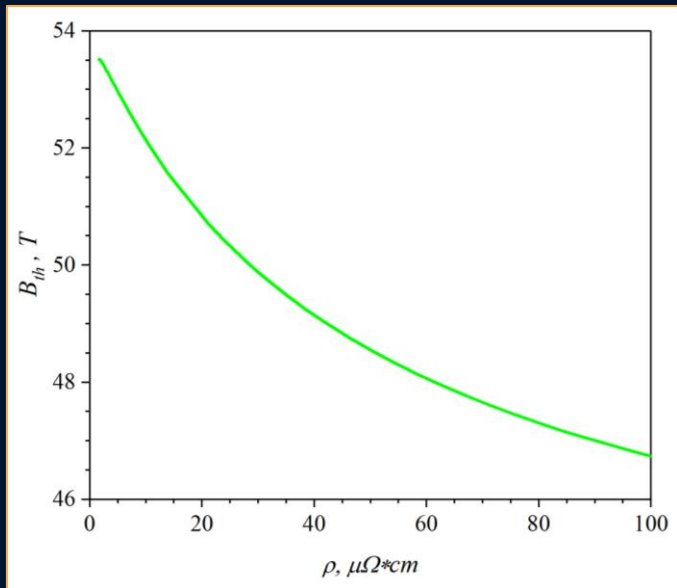
9



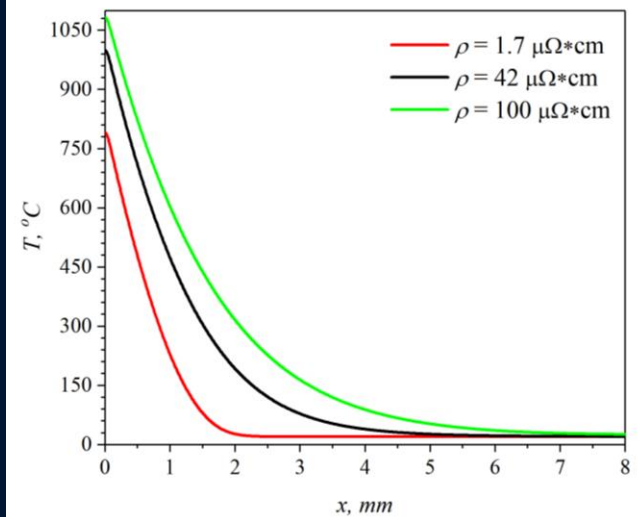
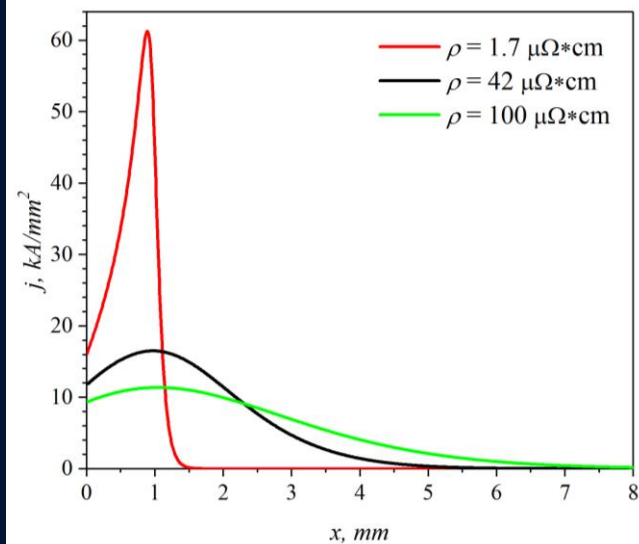
Параметры однородного материала



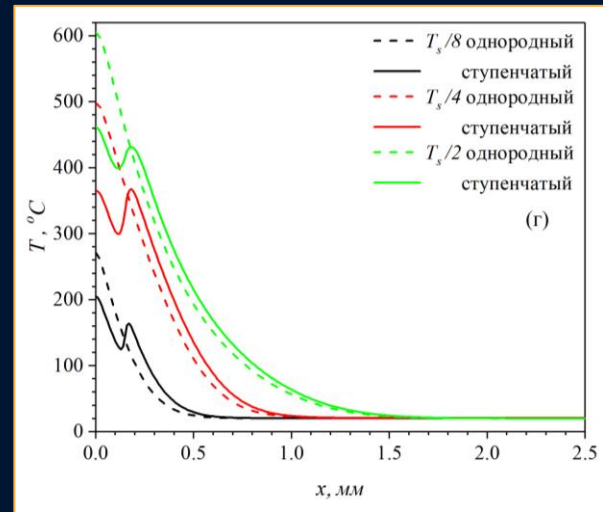
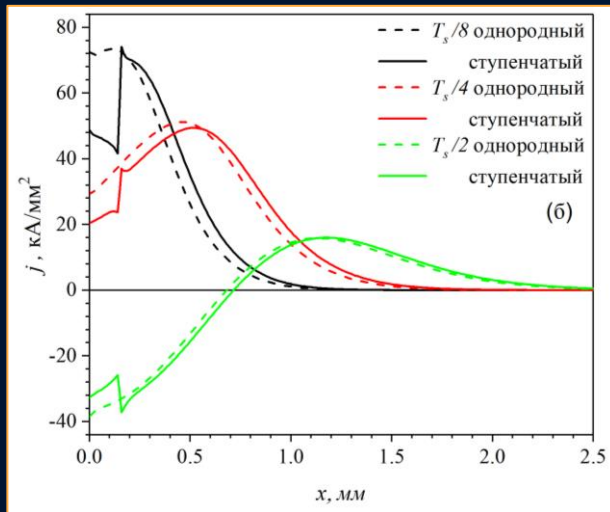
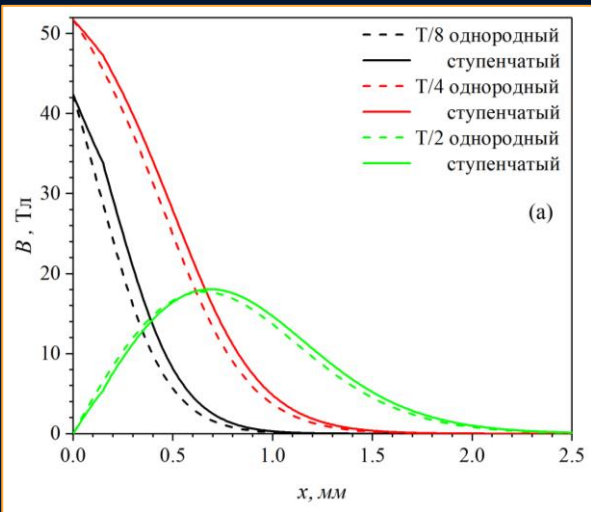
Удельное сопротивление



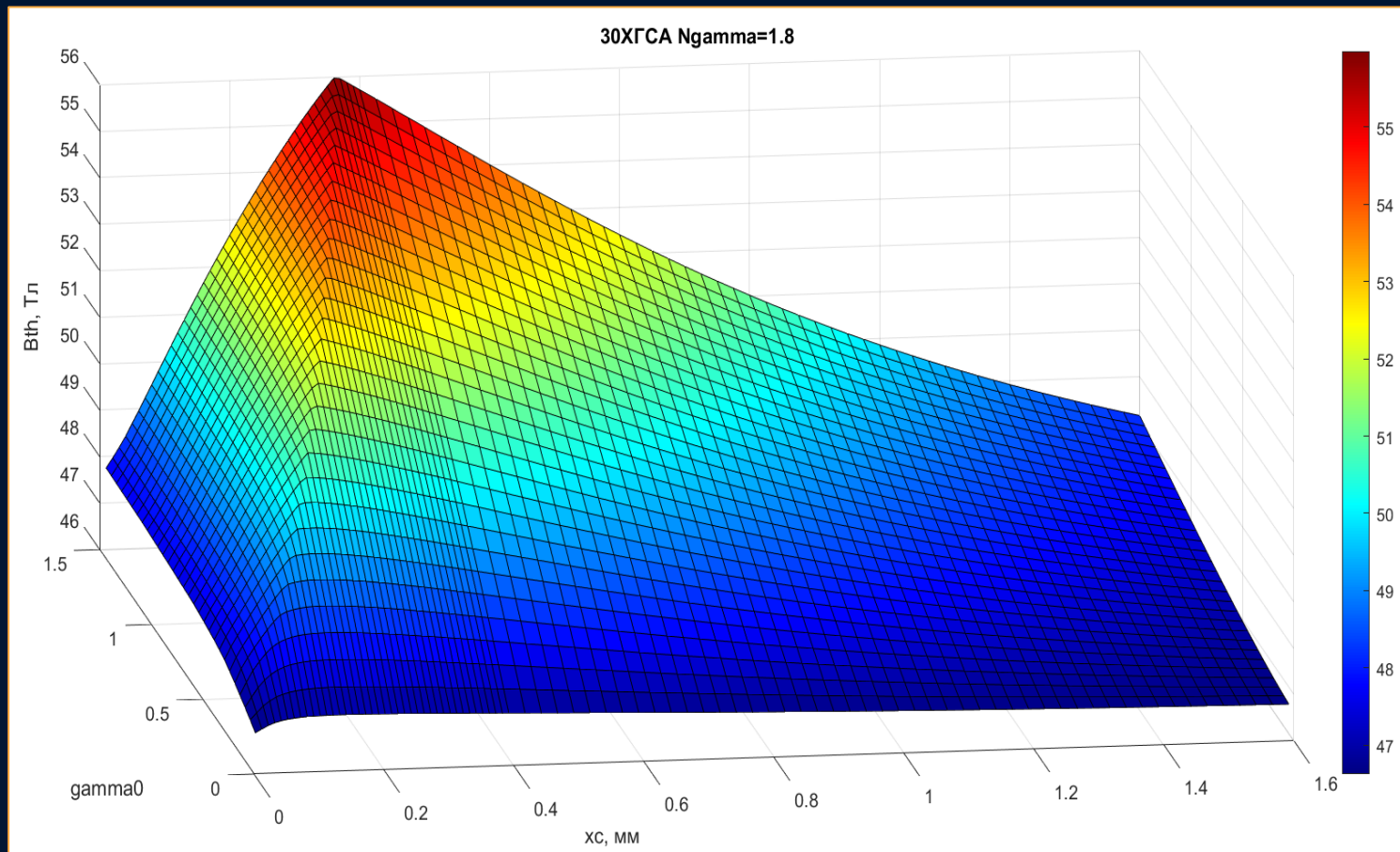
$$Q \sim j^2 \rho$$



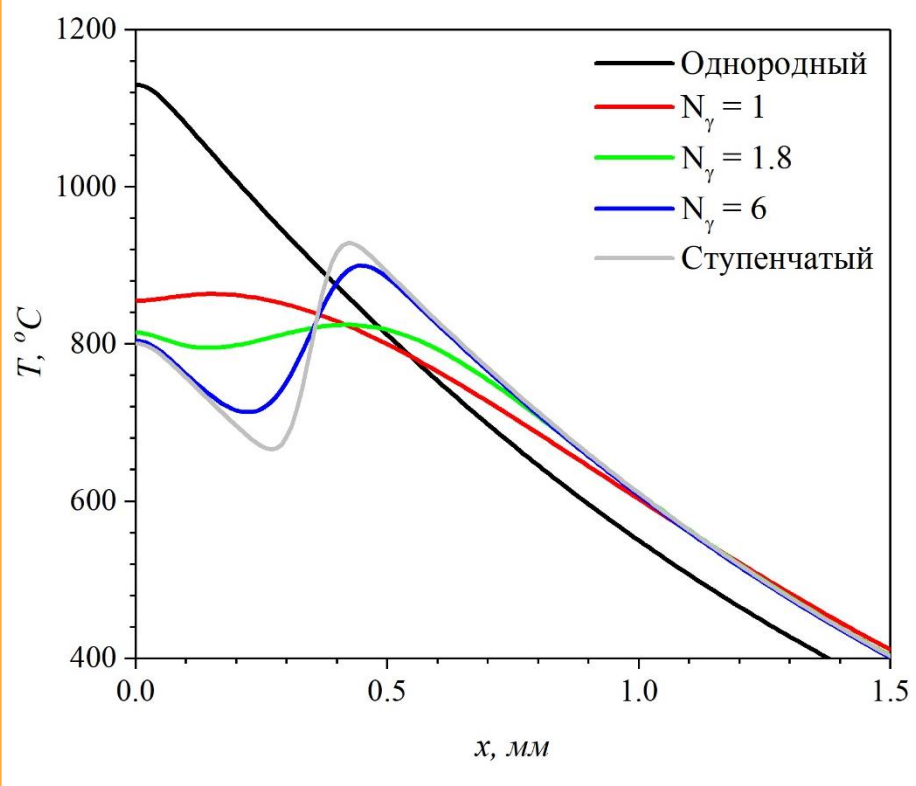
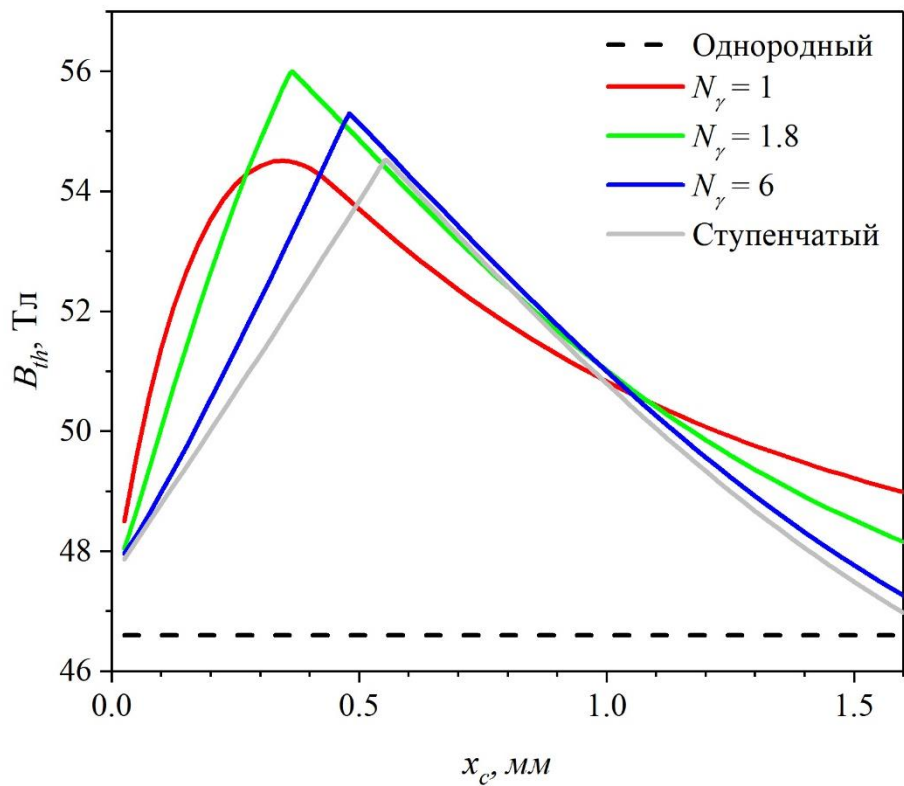
Процесс магнитной диффузии



Результаты моделирования



Резкость профиля сопротивления и пороговое поле



Заключение

- Наиболее важны тепловые и механические характеристики материала
- **Низкое электрическое сопротивление** однородного материала позволяет заметно увеличить пороговое поле.
- Высокорезистивный слой повышает пороговое поле на **15-20 %**.

THANKS!

