

# **Моделирование процессов ползучести сегнетопьезокерамики при механическом, электрическом и комбинированном воздействии.**

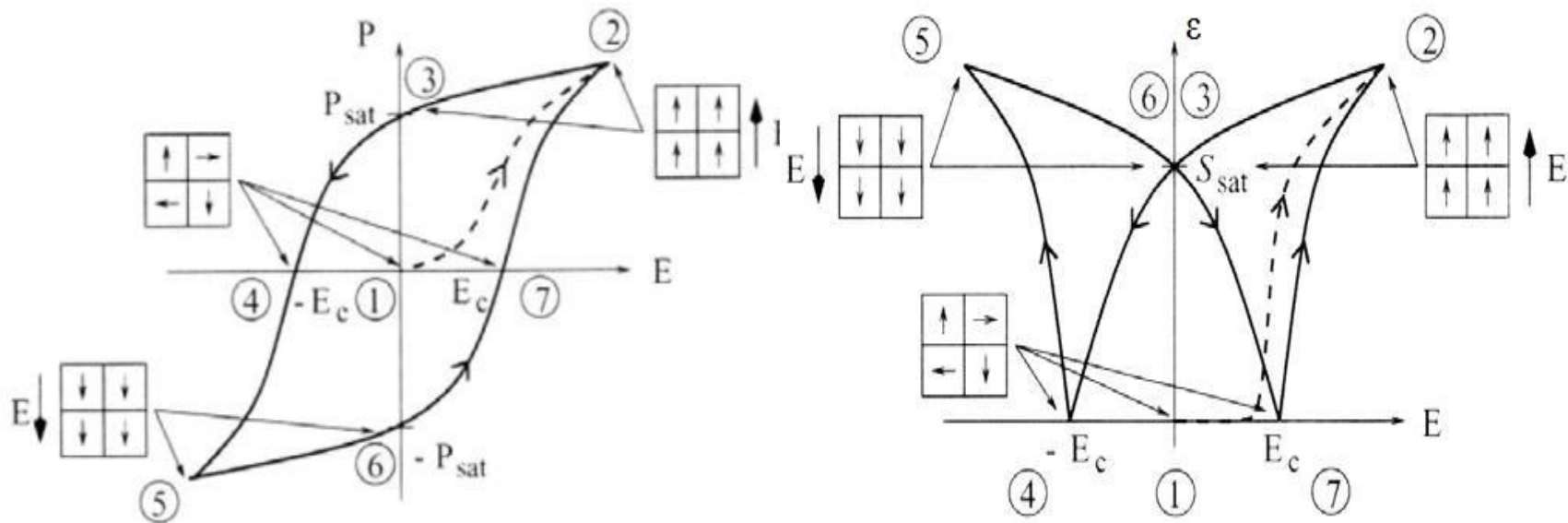
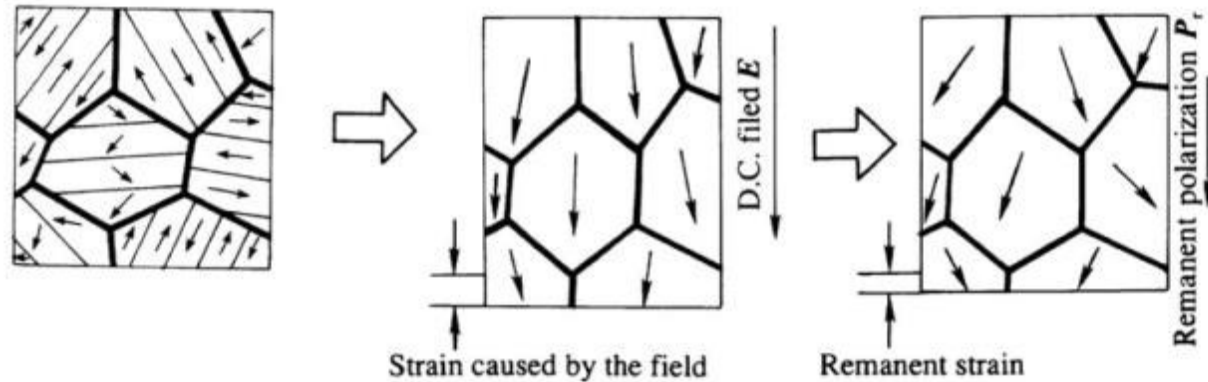
Работу выполнил: Лобанов С.М., гр. 63602/2

Научный руководитель: к.ф.-м.н., доцент Семенов А.С.

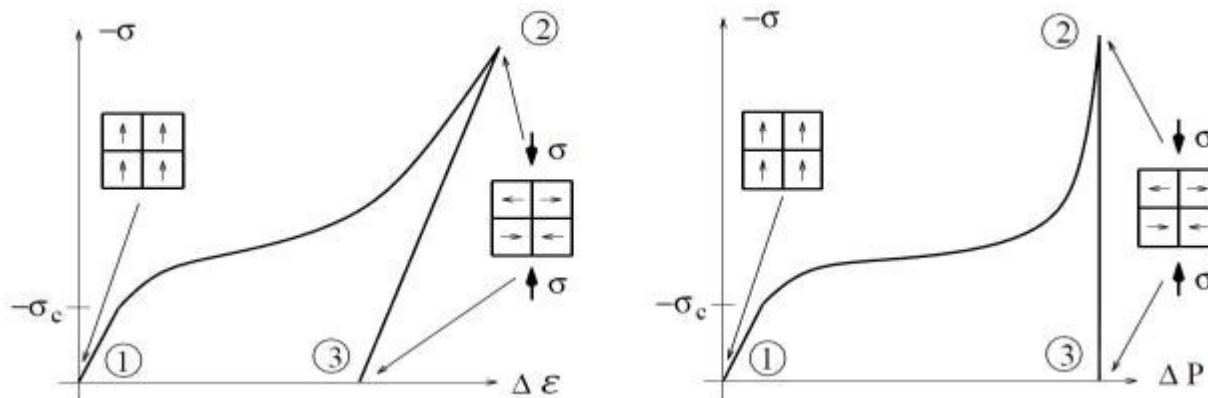
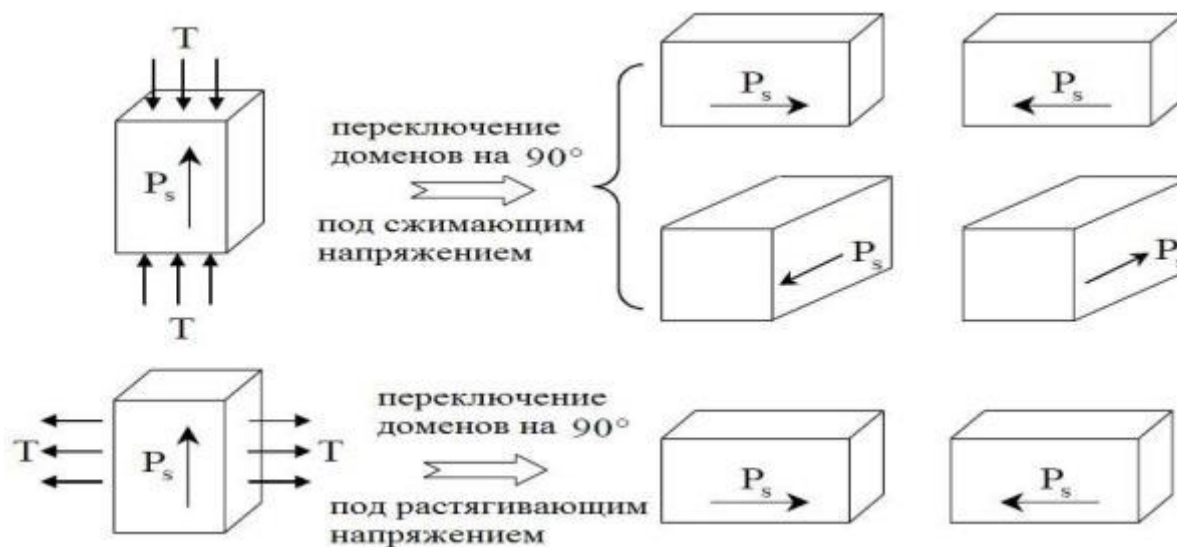
Рецензент: д.т.н., профессор Мельников Б.Е.

**2015**

# Механизм возникновения остаточной поляризации в сегнетоэлектриках



# Сегнетоэластическое переключение при механическом нагружении



# Общие уравнения сегнетоэластического материала

$$\sigma = {}^4C^D \cdot (\varepsilon - \varepsilon^r) - (D - P^r) \cdot {}^3h$$

$$E = -{}^3h \cdot (\varepsilon - \varepsilon^r) + \beta^\varepsilon \cdot (D - P^r)$$

$$\dot{\varepsilon}^r = \frac{\partial \Phi}{\partial \sigma}$$

$$\dot{P}^r = \frac{\partial \Phi}{\partial \tilde{E}}$$

$$\Phi = A \left( \frac{\hat{E} \cdot \hat{E}}{E_0^2} h_E \frac{1}{m^v} + \frac{3\hat{s} \cdot \hat{s}}{2\sigma_0^2} h_M \frac{1}{m^v} + \frac{\beta}{E_0 P_0 \sigma_0} \hat{E} \cdot \hat{s} \cdot P^r \right)^{m^v}$$

$$\hat{s} = \text{dev}(\sigma - \sigma_E)$$

$$\hat{E} = E - E_E$$

Склерономная модель Ландиса:

$$\Phi = \frac{\hat{E} \cdot \hat{E}}{E_0^2} + \frac{3\hat{s} \cdot \hat{s}}{2\sigma_0^2} + \frac{\beta}{E_0 P_0 \sigma_0} \hat{E} \cdot \hat{s} \cdot P^r - 1$$

Чисто электрическое одноосное нагружение:

$$\dot{P}_3^r = \tilde{A} (E_3 - E_{E3})^m h_E$$

$$\varepsilon_{33}^r = \varepsilon_0 \left( \frac{P_3^r}{P_0} \right)^2$$

$$\dot{P}^r = A m^v \left( \frac{\hat{E} \cdot \hat{E}}{E_0^2} h_E \frac{1}{m^v} + \frac{3\hat{s} \cdot \hat{s}}{2\sigma_0^2} h_M \frac{1}{m^v} + \beta \frac{\hat{E} \cdot \hat{s} \cdot P^r}{E_0 P_0 \sigma_0} \right)^{m^v-1} \left( \frac{2\hat{E}}{E_0^2} h_E \frac{1}{m^v} \right)$$

$$\dot{\varepsilon}^r = A m^v \left( \frac{\hat{E} \cdot \hat{E}}{E_0^2} h_E \frac{1}{m^v} + \frac{3\hat{s} \cdot \hat{s}}{2\sigma_0^2} h_M \frac{1}{m^v} + \beta \frac{\hat{E} \cdot \hat{s} \cdot P^r}{E_0 P_0 \sigma_0} \right)^{m^v-1} \left( \frac{3\hat{s}}{2\sigma_0^2} h_M \frac{1}{m^v} \right)$$

# Реономные модели (функции насыщения)

$$\dot{P}^r = \tilde{A}(E_3 - E_{B3})^m h_E$$

$$E_B = \frac{H_0^s P_0}{m^s - 1} \left[ \left( 1 - \frac{|P^r|}{P_0} \right)^{1-m^s} - 1 \right]$$

$$E_B = \alpha |P^r| + \beta |P^r|^3$$

Модель Ландау-Гинзбурга (1945):

$$\begin{cases} h_E^{DG} = 1 \\ m = 1 \end{cases}$$

Модель Ландиса (2002):

$$\begin{cases} h_E^L = 1 \\ h_M^L = 1 \end{cases}$$

Степенная модель

Модель Лиу-Хубера(2006):

$$h_E^{LH} = \frac{e^{-g(|P^r|)}}{t_0 g'(|P^r|)}$$

Ландау-Гинзбурга (2015):

$$\begin{cases} h_E^{DG} = 1 \\ m > 1 \end{cases}$$

где  $g(|P^r|) = \left( \frac{P_0}{P_0 - |P^r|} - \frac{P_0}{|P^r| + P^*} \right)$

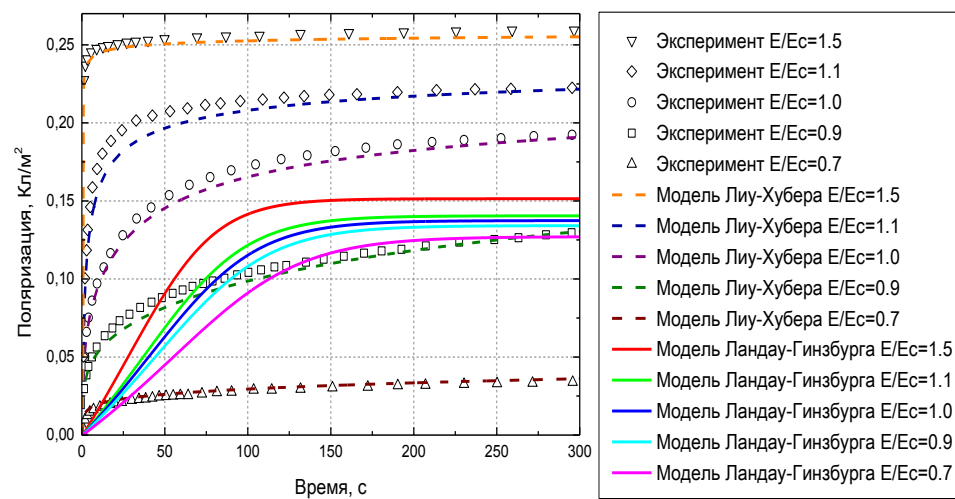
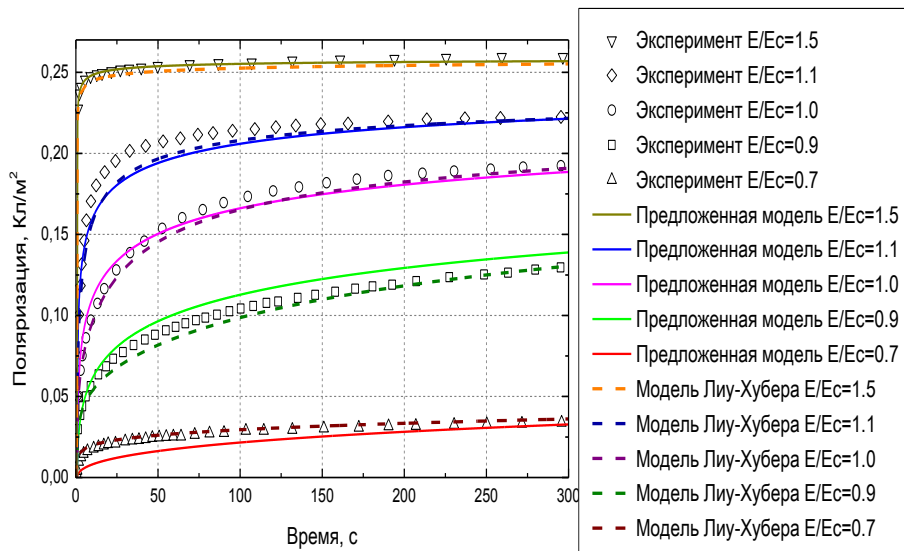
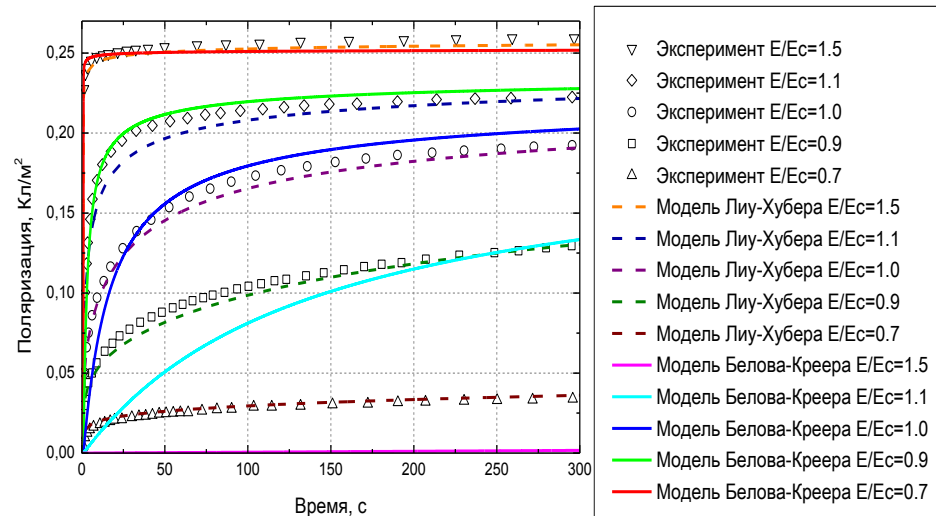
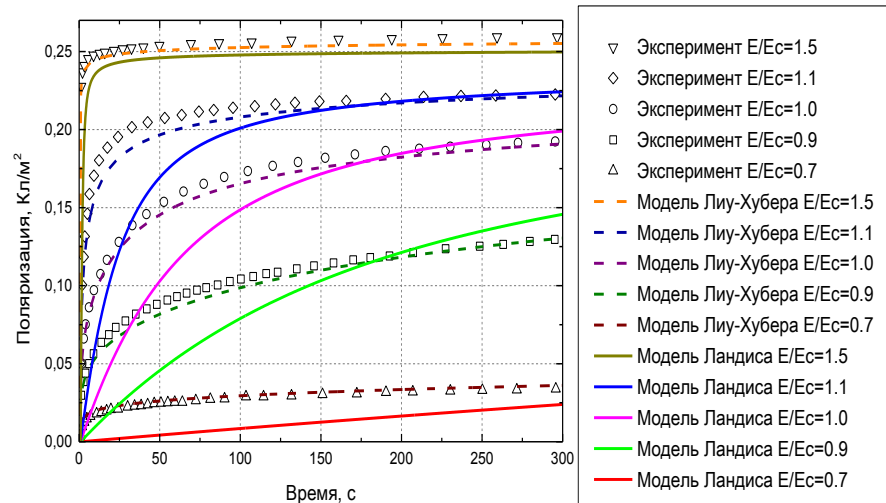
Модель Белова-Креера (2009):

$$h_E^{BK} = \frac{1}{E_2 - E_1} \frac{E_*}{m} e^{-m \left( 1 - \frac{|\hat{E}| - E_1}{E} \right)} \times \begin{cases} 1 - e^{-m \frac{|\hat{E}| - E_1}{E}}, & E_1 < |\hat{E}| < E_2 \\ 1 - e^{-m \frac{E_2 - E_1}{E}}, & E_2 < |\hat{E}| \end{cases}$$

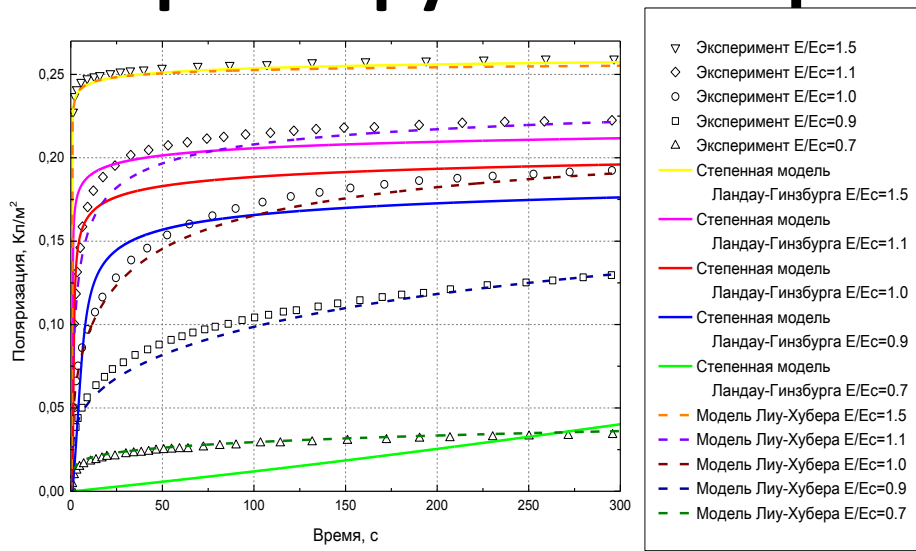
Предложенная модель (2015):

$$\begin{cases} h_E^{Pr} = \left( \frac{|P^r|}{P_0} \right)^n \left( 1 - \frac{|P^r|}{P_0} \right)^k \\ h_M^{Pr} = \left( \frac{\|\varepsilon^r\|}{\varepsilon_0} \right)^n \left( 1 - \frac{\|\varepsilon^r\|}{\varepsilon_0} \right)^k \end{cases}$$

# Сравнение предложенной модели с экспериментом над PZT-5Н. Ползучесть.



# Итоги моделирования ползучести поляризации при нагружении образца материала PZT 5Н.

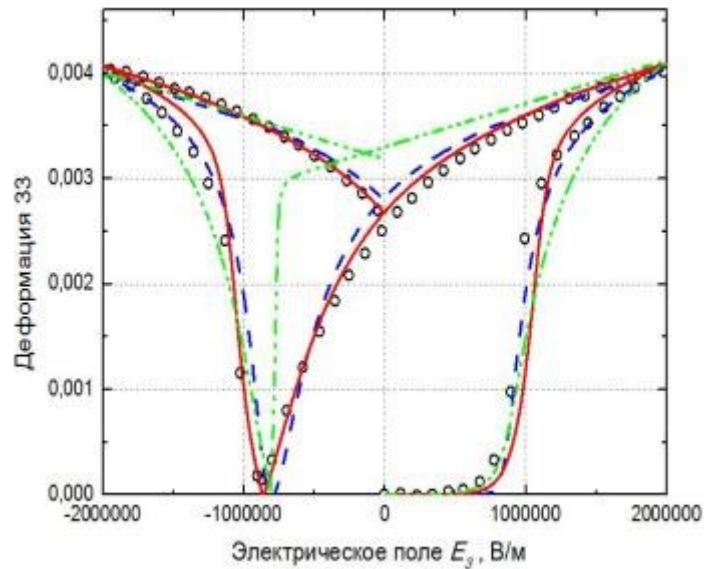
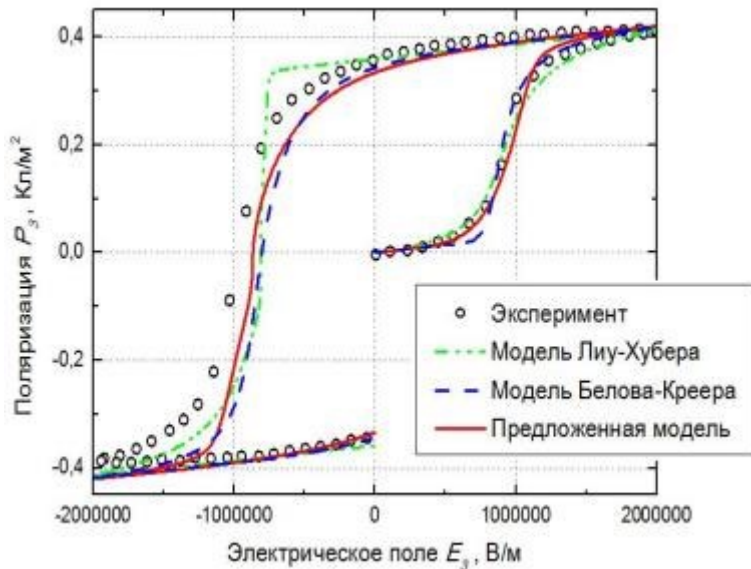


Погрешности моделирования по максимальному отклонению модельной кривой от экспериментальных данных

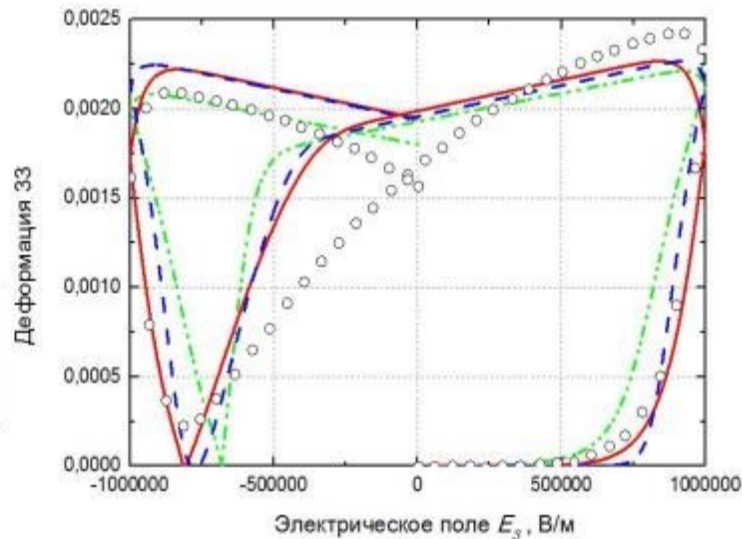
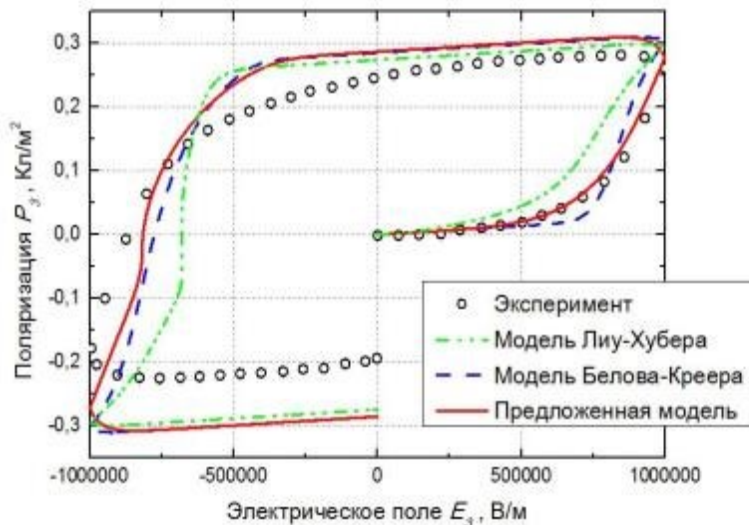
$E/E_c$	0.7	0.9	1	1.1	1.5
Модель					
Модель Ландиса	0,02053	0,05108	0,07289	0,11872	0,15987
Модель Лиу-Хубера	0,0045	0,00742	0,00714	0,01701	0,0072
Модель Белова-Креера	0,03221	0,04736	0,04539	0,04915	0,01327
Предложенная модель	0,00975	0,00943	0,01129	0,02263	0,00267
Модель Ландау-Гинзбурга	0,09053	0,04952	0,09858	0,16601	0,23646
Степенная модель Ландау-Гинзбурга	0,01919	0,07013	0,07156	0,06276	0,00408

# Циклическое нагружение электрическим полем образца материала PZT PIC 151

Амплитуда  
 $E=2 \text{ МВ/м}$ ,  
 скорость  
 $v=0.02 \text{ МВ/м/с}$   
 частота  
 $f=0.0025 \text{ Гц}$

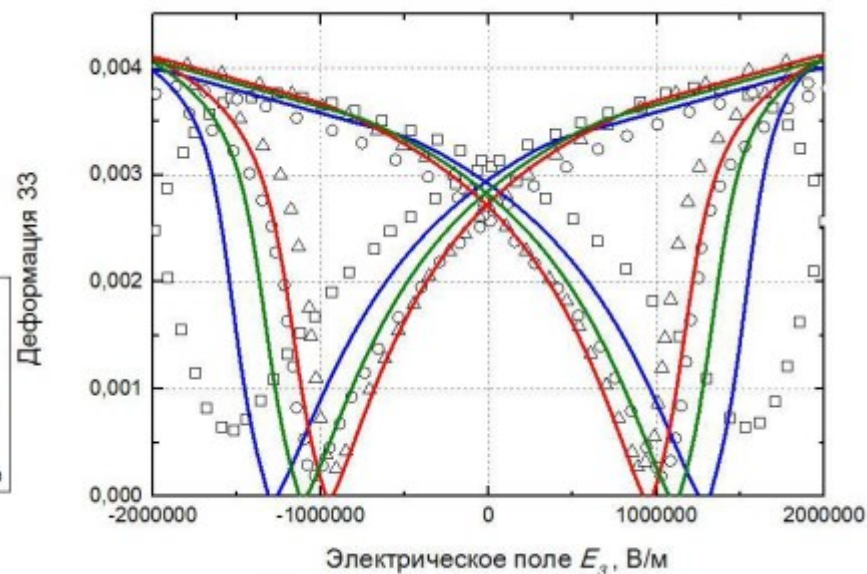
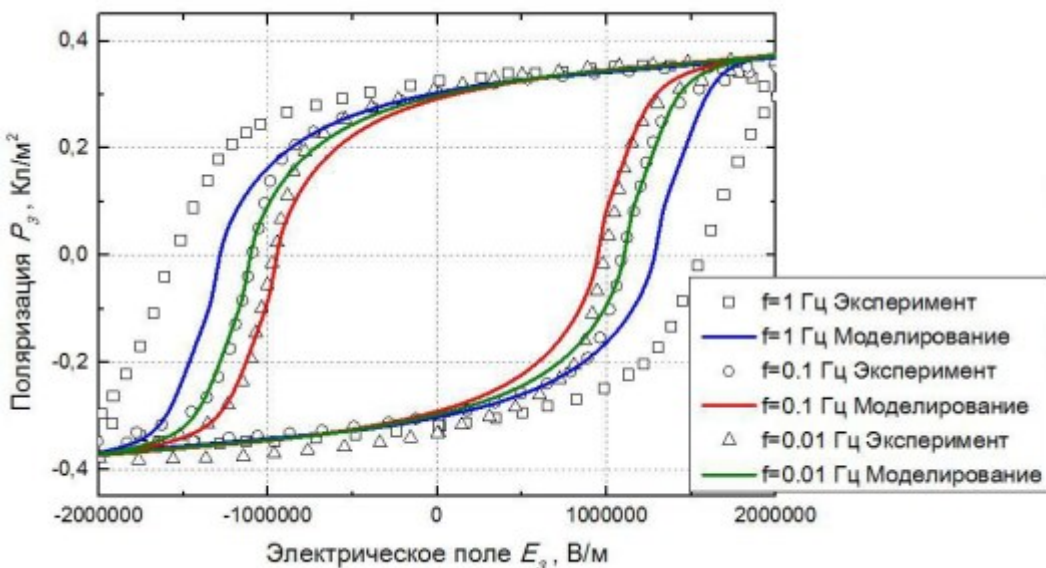


Амплитуда  
 $E=1 \text{ МВ/м}$ ,  
 скорость  
 $v=0.02 \text{ МВ/м/с}$   
 частота  
 $f=0.005 \text{ Гц}$





# Зависимость от частоты нагружения при циклической нагрузке

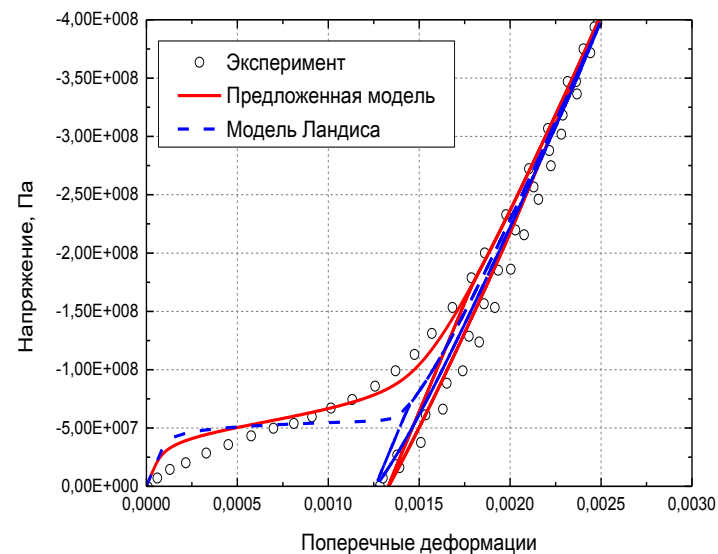
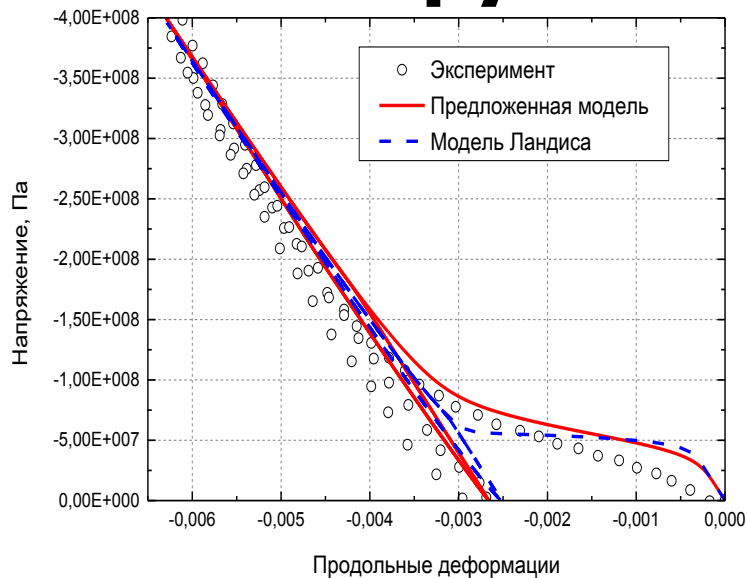


Сравнение результатов моделирования по предложенной модели с экспериментом по одноосному нагружению переменным электрическим полем амплитуды  $E=2$  МВ/м частоты нагружения:  $f=1$ ; 0.1; 0.01 Гц

# Одноосное циклическое механическое нагружение

$$\sigma_{33} = -400 \text{ МПа}$$

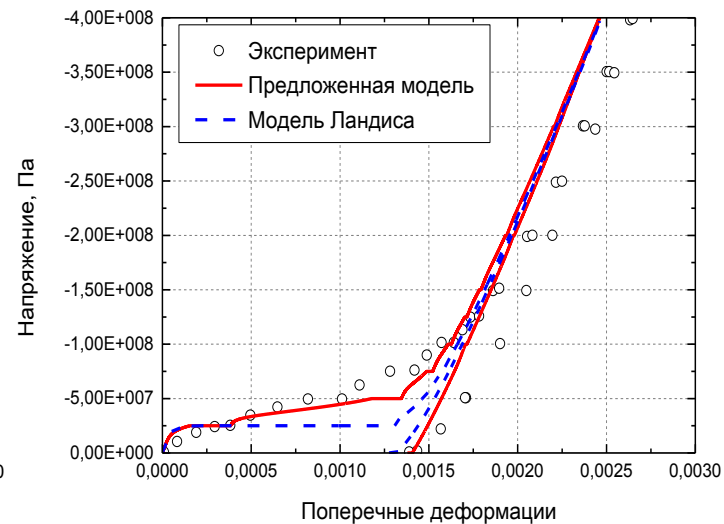
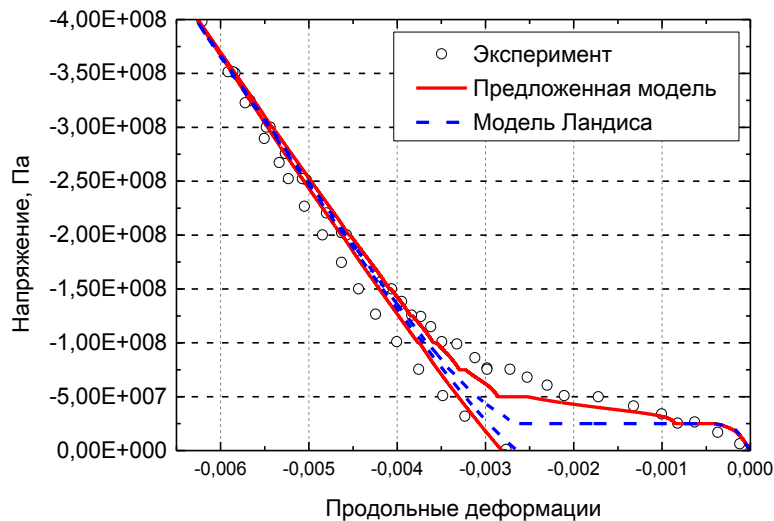
$$v = 5 \text{ МПа/с}$$



$$\sigma_{33} = -400 \text{ МПа}$$

$$v = 4 \text{ МПа/с}$$

с выдержками  
по 240 с



# Расчет пьезо-привода туннельного микроскопа

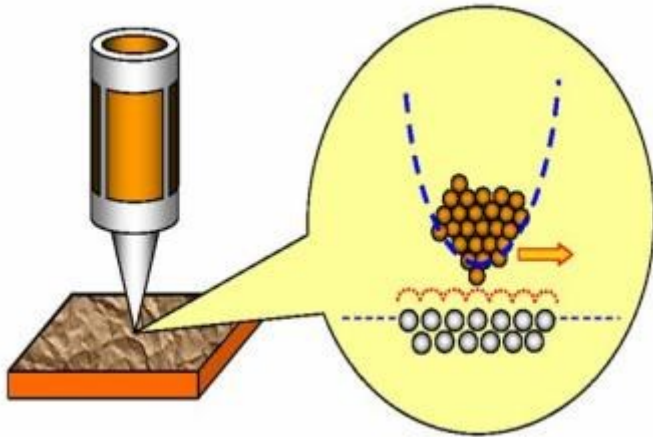
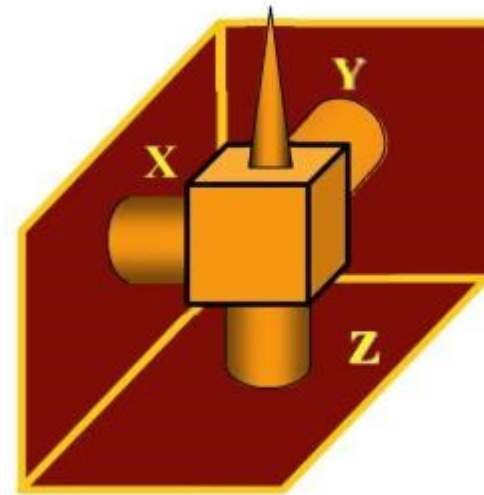
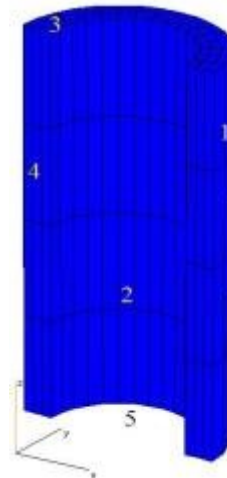


Схема работы СТМ



Трипод



Конечно-элементная модель

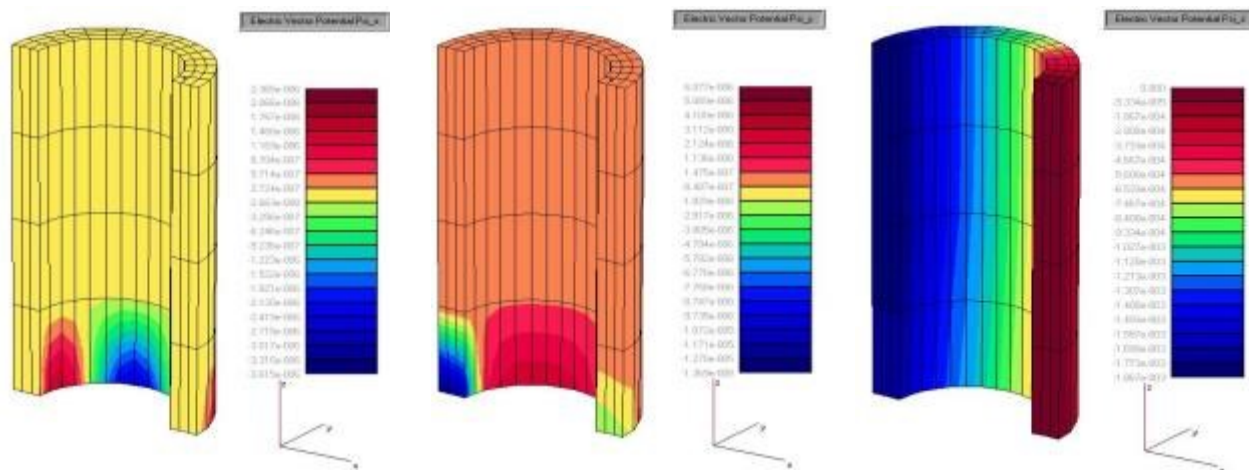
- внутренний радиус  $r_1=0.005$  м;
- внешний радиус  $r_2=0.007$  м;
- высота цилиндра  $h=0.029$  м;
- ширина электрода  $a=0.008$  м.

# Расчет пьезо-привода туннельного микроскопа

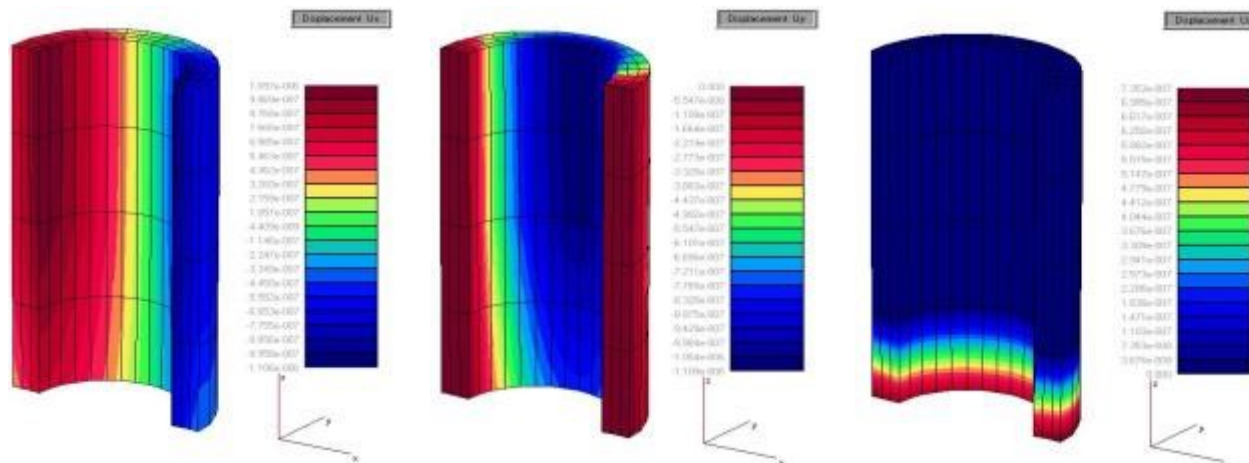
## Нелинейная сегнетоэлектрическая постановка

Перемещение  
в узле (0.005, 0, 0):

Желаемое перемещение $u_z, 10^{-8}$ м	3,75
Перемещение после ползучести $u_z, 10^{-8}$ м	3,71
Погрешность	1%



Поля компонент электрического векторного потенциала  $\psi$ , КВ/м



Поля компонент смещения  $u$ , м

# Выводы

- Произведен анализ предсказательной способности шести реономных моделей сегнетоэлектроупругого материала.
- Рассматривались следующие виды нагружения для исходно поляризованной и неполяризованной поликристаллических керамик:
  - Нагружение при постоянном уровне электрического поля
  - Циклическое нагружение при постоянной амплитуде электрического поля без промежуточных выдержек в широком диапазоне частот и амплитуд нагружения
  - Циклическое нагружение при постоянной амплитуде электрического поля с промежуточными выдержками
  - Циклическое нагружение при постоянной амплитуде механических сжимающих напряжений без промежуточных выдержек
  - Циклическое нагружение при постоянной амплитуде механических сжимающих напряжений с промежуточными выдержками
- Предложенная на основе модификации модели Ландиса путем введения функций упрочнения реономная модель продемонстрировала высокую точность результатов при всех видах нагружения, соизмеримую с наиболее точной моделью Лиу-Хубера. Приемлемую точность продемонстрировала модель Белова-Креера (2009). Модели Ландиса (2002) и Ландау-Гинзбурга (1945) показали весьма низкую точность при описании явлений ползучести и для практического применения требуют дальнейших модификаций.
- Выполнен анализ чувствительности отклика моделей при варьированию параметров.
- С использованием предложенной реономной модели материала методом конечно-элементного моделирования решена задача о пьезоэлектрическом приводе сканирующего туннельного микроскопа с учетом эффектов ползучести.

Спасибо за внимание!