



VI РОССИЙСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ  
ПО МОЛНИЕЗАЩИТЕ

17—19 апреля, 2018. Санкт-Петербург

# РАСЧЕТ ЗАЗЕМЛИТЕЛЕЙ МОЛНИЕЗАЩИТЫ С УЧЕТОМ ЧАСТОТНОЙ ЗАВИСИМОСТИ ПРОВОДИМОСТИ ЗЕМЛИ

С.Л. Шишигин, А.В. Черепанов, Д.С. Шишигин

Вологодский государственный университет,

ООО «ЗУМ» [zym-emc.ru](http://zym-emc.ru)

# Модель грунта

<b>Стандартная:</b> $\sigma = \text{const}$ , $\varepsilon = \text{const}$ .	<b>Частотно-зависимая:</b> $\sigma(\omega)$ , $\varepsilon(\omega)$
<u>Адекватность ставится под сомнение:</u> экспериментально доказано снижение сопротивления заземлителя на 50% и более с увеличением частоты от 100 Гц до 1 МГц.	<u>Требует изучения:</u> $\sigma(\omega)$ , $\omega\varepsilon(\omega)$ возрастает с увеличением $\omega$ , $\varepsilon_r > 1000$ на низких частотах.

## Методы расчета заземлителей молниезащиты

<b>В частотной области</b> (частотный метод)	<b>Во временной области</b> (метод дискретных схем, метод Влаха)
Эффективен в модели $\sigma(\omega)$ , $\varepsilon(\omega)$ , но <u>непригоден для задач молниезащиты</u> (нельзя учесть нелинейные элементы)	<u>Эффективны</u> в задачах молниезащиты, но позволяют учесть $\sigma(\omega)$ , $\varepsilon(\omega)$ .

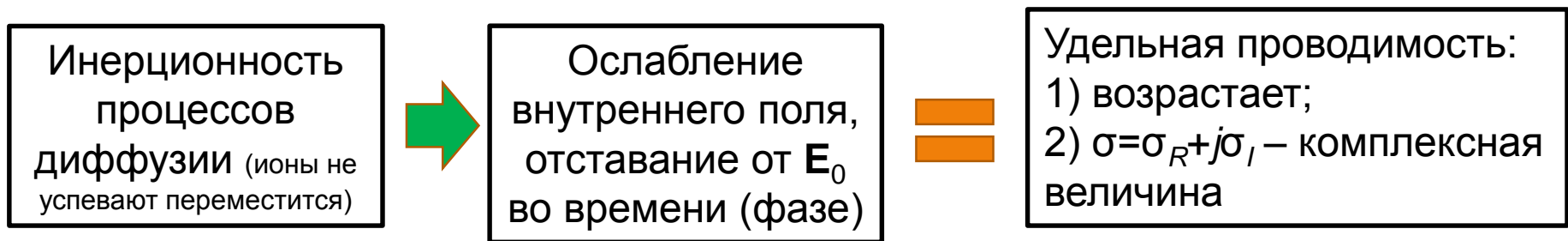
### Цель работы:

1. Изучить модели грунта с частотно-зависимыми параметрами
2. Разработать методы расчета заземлителей в грунте с частотно зависимыми параметрами во временной области
3. Оценить погрешность расчета заземлителей молниезащиты без учета частотных свойств земли и дать практические рекомендации.

# Физические процессы, определяющие частотные свойства электропроводности грунта



## Специфика на высокой частоте



Комплексная удельная проводимость

$$\sigma(j\omega) = \sigma + j\omega\varepsilon = \sigma_R + j\omega\varepsilon'$$

эквивалентная (кажущаяся) диэлектрическая проницаемость (может быть  $>1000\varepsilon_0$  на 100 Гц за счет мнимой составляющей комплексной удельной проводимости)

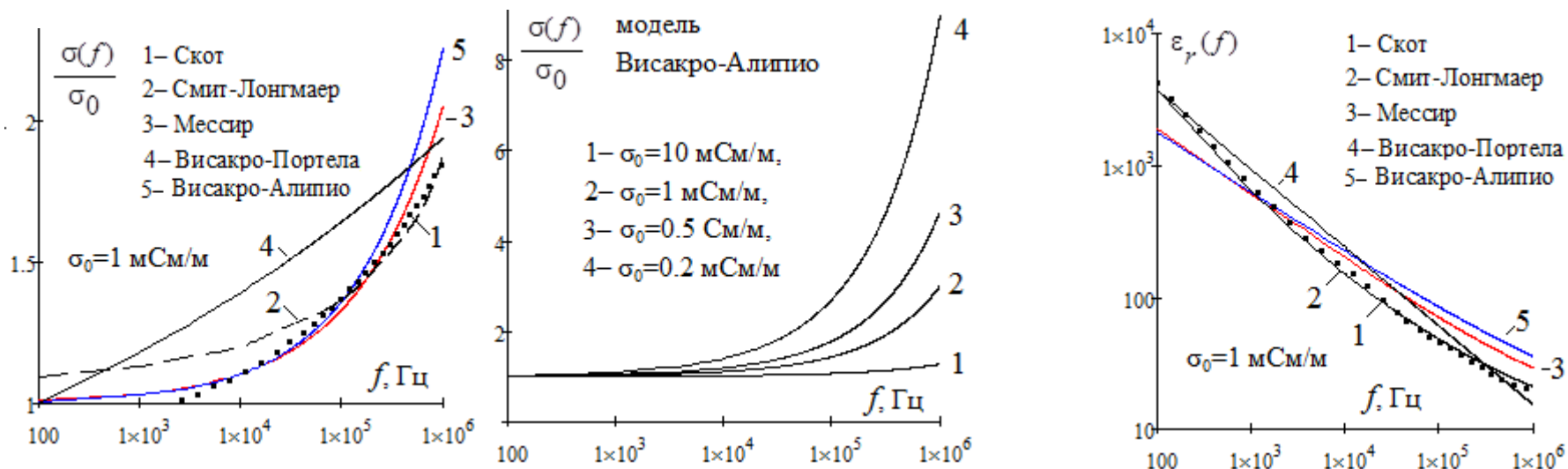
$$\varepsilon' = \varepsilon + \sigma_I / \omega$$

# Модели грунта с частотно зависимыми параметрами

Классическая модель Cole-Cole требует задания параметров, которые сложно определить.

$$\sigma(j\omega) = \sigma_0 + \sigma_0 \frac{\gamma(j\omega\tau)^c}{1+(1-\gamma)(j\omega\tau)^c}$$

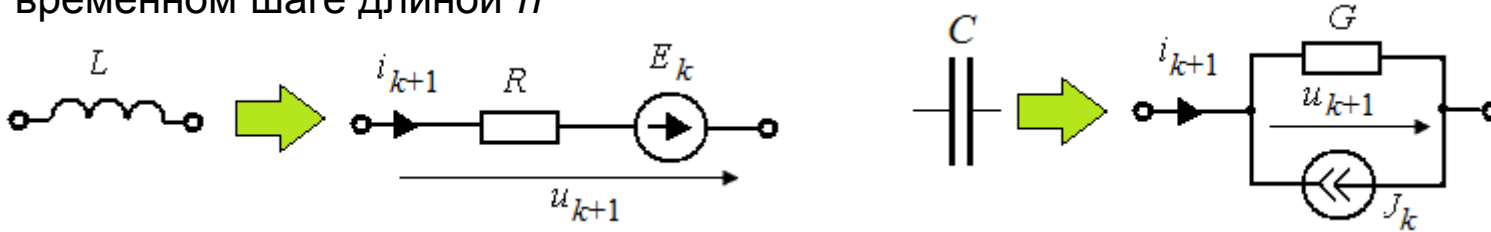
**АНАЛИЗ современных моделей** (формулы в статье): удельная проводимость возрастает в несколько раз, диэлектрическая проницаемость снижается на два порядка в молниевом диапазоне частот



Выбраны: модели 3-Мессира и 5-Висакро-Алипио (2014 г.).

# Методы расчета переходных процессов во временной области

Индуктивности и емкости заменяются резистивными или комплексными схемами на  $k$ -временном шаге длиной  $h$



**Метод дискретных схем**  $R = 2L/h$ ;  $E_k = Ri_k + u_k$ ;  $G = 2C/h$ ;  $J_k = Gu_k + i_k$

**Метод Влаха** (численный вариант операторного метода)

$$R = sL, E_k = LI_k, G = sC, J_k = CU_k, s = (2 + j\sqrt{2})/h, f(t) = \text{Re}[(5\sqrt{2}j - 2) \cdot F(s)]/h$$

**ДОКАЗАНО:** Любое операторное сопротивление  $Z(s) = s^r \cdot L$  сводится к дискретной схеме индуктивности, любая операторная проводимость  $Y(s) = s^r \cdot C$  сводится к дискретной схеме емкости при  $0 < r < 1$ .

$$y(j\omega) \Rightarrow Y(s) \Rightarrow y(t) = \mathcal{L}^{-1}[Y(s)/s^2] \Rightarrow Y_k = \frac{y(kh+h) - y(kh)}{h}, k = 0..N-1$$

$$G = Y_0, J_0 = 0, J_{k+1} = Y_0 \cdot u_{k+1} - \sum_{m=1}^k (Y_{k-m} - Y_{k-m+1}) u_m, k = 0..N-1$$

# Преобразование модели Мессира к форме $\sigma(j\omega)$

$$\sigma(f) = \sigma_0 \left( 1 + \sqrt{\frac{4\pi \cdot f \cdot \varepsilon}{\sigma_0}} \right), \quad \varepsilon_r(f) = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \left( 1 + \sqrt{\frac{\sigma_0}{\pi \cdot f \cdot \varepsilon}} \right)$$

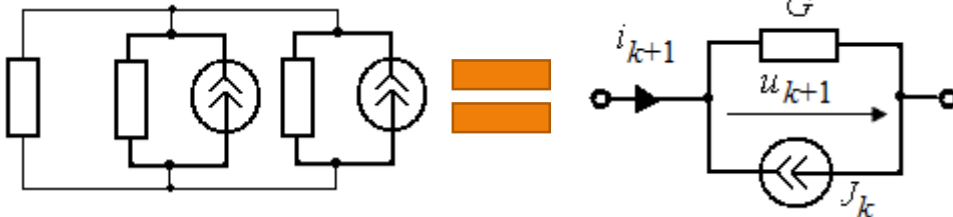
$\sigma_0$  – удельная проводимость при частоте 100 Гц,  $\varepsilon$  – диэлектрическая проницаемость на высокой частоте

**Комплексная удельная проводимость**  $\sigma(j\omega) = \sigma(f) + j\omega\varepsilon_0\varepsilon_r(f)$

$$\sigma(j\omega) = \sigma_0 + j\omega\varepsilon + 2\sqrt{j\omega\varepsilon\sigma_0}$$

Последнее слагаемое отражает увеличение удельной проводимости за счет частотных свойств грунта  
 Модель Мессира – частный случай модели Cole-Cole при  $c=0.5, \eta=1, \tau=4\varepsilon/\sigma_0$

**Дискретная модель заземлителя в грунте с комплексной удельной проводимостью  $\sigma(j\omega)$**



$$Y(s) = 2k_g \cdot \sqrt{s\varepsilon\sigma_0} \quad \rightarrow$$

$$y(t) = L^{-1} \left[ y(s)/s^2 \right] = 4k_g \cdot \sqrt{\frac{\varepsilon\sigma_0 t}{\pi}} \quad \rightarrow$$

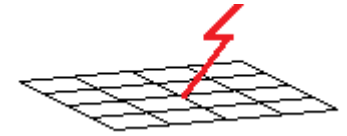
$$Y_k = 4k_g \cdot \sqrt{\frac{\varepsilon\sigma_0}{\pi h}} (\sqrt{k+1} - \sqrt{k})$$

**ВЫВОД:** Дискретная модель заземлителя в грунте с частотно-зависимой проводимостью  $\sigma(j\omega)$  не усложняется.

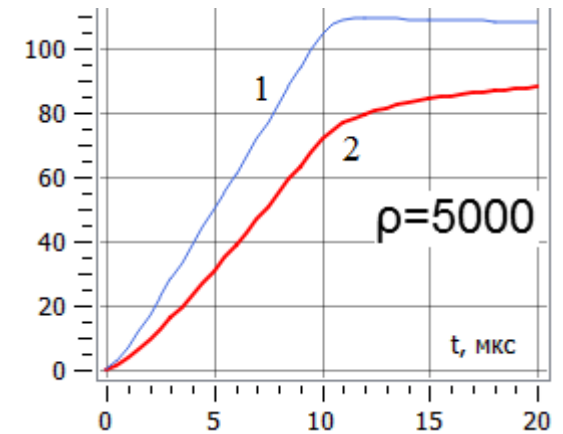
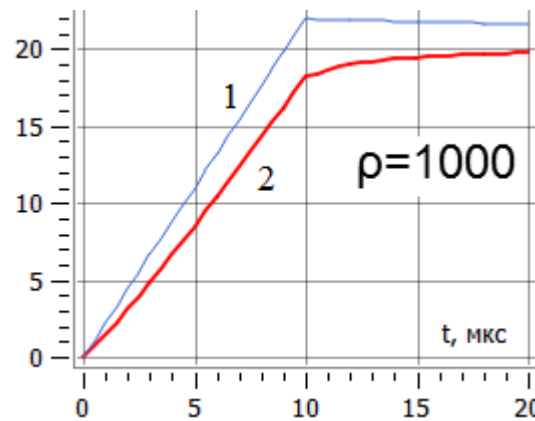
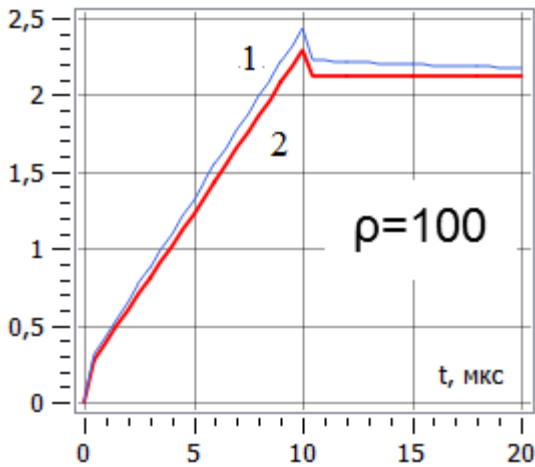
Преобразование модели Висакро-Алипио производится аналогично.

# Напряжение заземлителя в грунте с 1) $\sigma = \text{const}$ , 2) $\sigma(j\omega)$

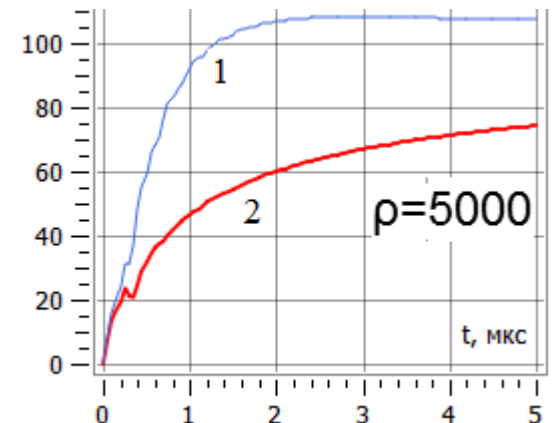
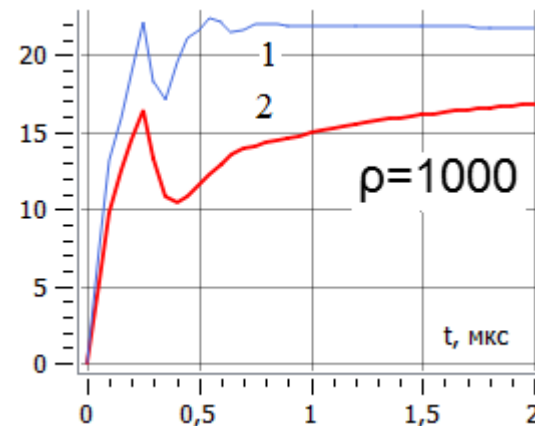
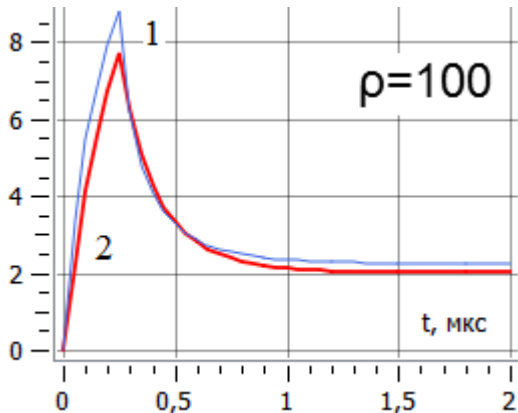
**Заземлитель:** сетка 20x20 м, шаг сетки 5 м, стержни стальные,  $\mu_r = 200$ , диаметр 20 мм, глубина погружения 1 м,  $\epsilon_r = 10$ . Модель грунта по **Мессиру**. Импульс с линейным фронтом.



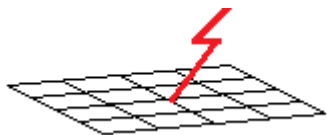
## Первый импульс тока молнии



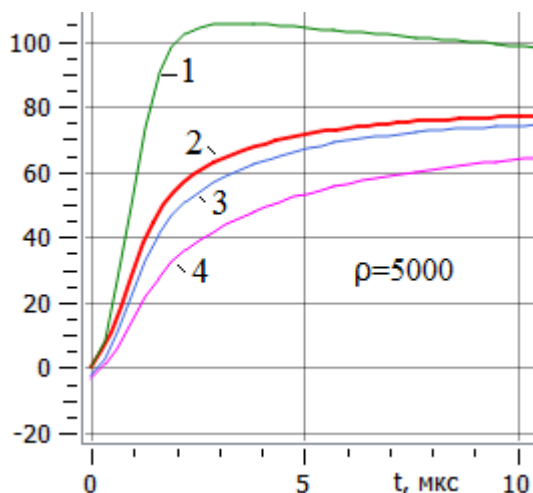
## Второй импульс тока молнии



# Затухание длинных и коротких импульсов в грунте с $\sigma(j\omega)$

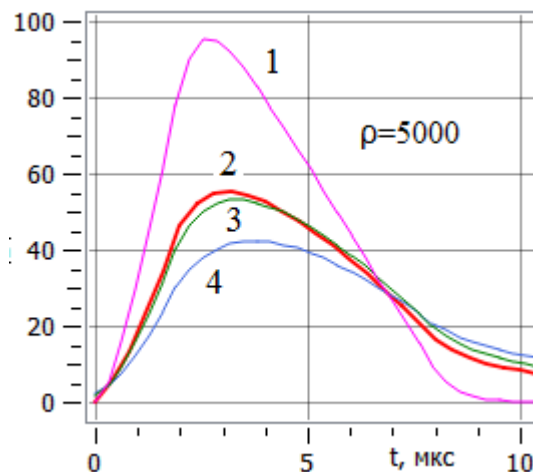


**Заземлитель:** сетка 20x20 м, шаг сетки 5 м, стержни стальные,  $\mu_r=200$ , диаметр 20 мм, глубина погружения 1 м,  $\epsilon_r=10$



**Длинный импульс** (10/350 мкс):  
Существенное сглаживание фронта (в 5 раз)  
при небольшом (15-20%) уменьшении  
амплитуды.

Причина: Длинный «хвост» импульса



**Короткий (срезанный) импульс** (1/5 мкс):  
Существенное (в два раза) снижение амплитуды при  
неизменном фронте импульса.

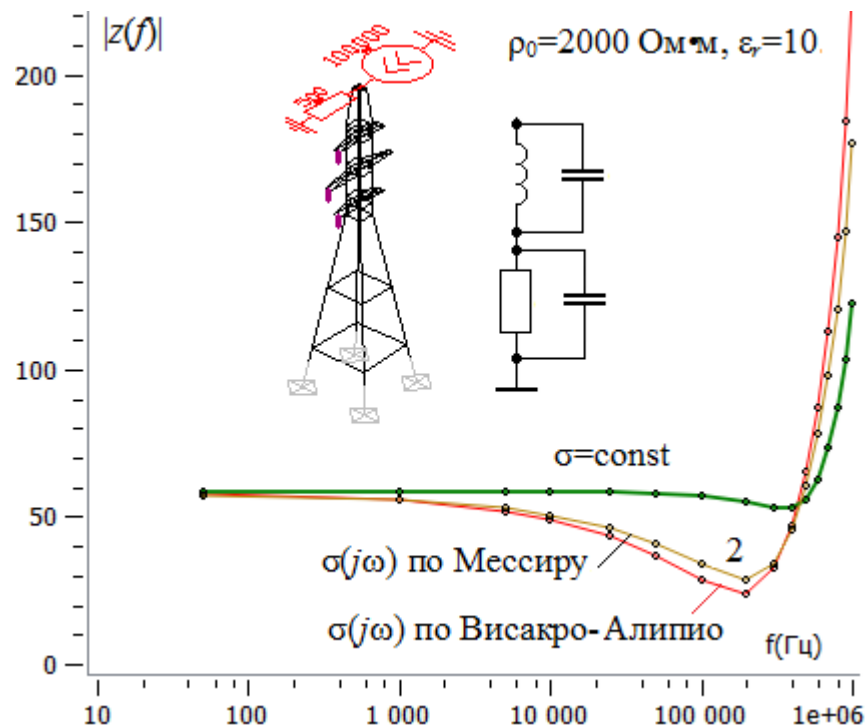
Причина: Короткий «хвост» импульса

**Влияние частотных свойств** грунта по  
Висакро-Алипио сильнее, чем по Мессирю

**Достоверность:** расчеты методом Влаха с  
использованием дискретных моделей частотной  
проводимости  $\sigma(j\omega)$  совпадают с расчетами  
частотным методом



# Частотная характеристика опоры ВЛ в грунте с $\sigma(j\omega)$



## Результаты:

1. До 10 кГц влияние  $\sigma(j\omega)$  незначительно
2. На частотах 100-200 кГц модуль сопротивления опоры снижается в 1.7-1.9 раза по модели Мессира и 2-2.3 раза по модели Висакро-Алипио.
3. Неожиданно: С частоты 800 кГц сопротивление в грунте с  $\sigma(j\omega)$  больше, чем при  $\sigma = \text{const}$ . На частоте 1 МГц больше в 1.5-1.8 раза (неожиданно).

**Причина:** Емкость заземлителя, которая включена параллельно индуктивности, возрастает, резонансная частота уменьшается, отсюда увеличение сопротивления, заметное вблизи резонансной частоты.

**Вывод:** Сопротивление опоры на частотах молнии существенно зависит от частотных свойств грунта. Снижение удельной проводимости с увеличением частоты не означает снижение сопротивление опоры.

## **Выводы:**

- 1) Сопротивление заземлителя на частотах молнии существенно зависит от частотных свойств грунта и тем сильнее, чем ниже проводимость грунта.
- 2) Снижение удельной проводимости с увеличением частоты приводит к снижению сопротивления заземлителя, однако не гарантирует снижение сопротивления опоры. В грунте с проводимостью  $\sigma(j\omega)$  резонансная частота (резонанса тока) снижается, что приводит к возрастанию сопротивления опоры на частотах порядка 1 МГц.
- 3) Расчеты на эквивалентной частоте в грунте с проводимостью  $\sigma(j\omega)$  неадекватны.
- 4) Разработанная дискретная модель проводимости заземлителя в грунте с частотно-зависимой проводимостью  $\sigma(j\omega)$  не усложняет расчеты по сравнению с традиционной моделью грунта  $\sigma = \text{const}$ . Достоверность разработанной модели подтверждена сравнением с результатами, полученными частотным методом.

**СПАСИБО за внимание**