



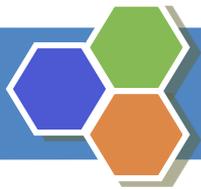
**Национальный исследовательский центр
“Курчатовский институт”**



Расчет нестационарных трехмерных нейтронно-физических тестов международного бенчмарка C5G7-TD по программе SUHAM-3D-TD

В.Ф. Бояринов

**Всероссийская научно-техническая конференция
«Нейтронно-физические проблемы атомной энергетики» («Нейтроника-2019»), 27-29 ноября 2019 г., Обнинск, Калужская обл.**



- В рамках международного нестационарного бенчмарка C5G7-TD в Курчатовском институте проводятся расчеты трехмерных тестов этого бенчмарка по программе SUHAM-3D-TD.
- В программе SUHAM-3D-TD реализованы нестационарные трехмерные конечно-разностные уравнения метода поверхностных гармоник с тремя поперечными и двумя продольными пробными матрицами для реактора с квадратной решеткой.
- В данной работе приведены результаты расчетов пяти трехмерных нестационарных тестов с движением групп управляющих стержней (тесты TD4-1, TD4-2, TD4-3, TD4-4 и TD4-5) и четырех нестационарных тестов, связанных с возмущением плотности теплоносителя в активной зоне модельного легководного реактора типа PWR, а именно тестов TD5-1, TD5-2, TD5-3, TD5-4.





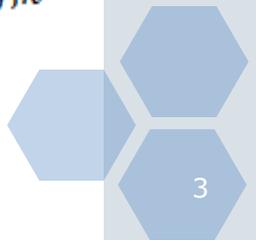
Трёхмерные нестационарные уравнения метода поверхностных гармоник, реализованные в программе SUHAM-3D-TD

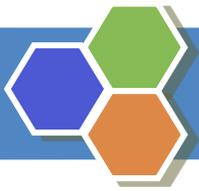
$$\mathbf{v}_{inv} \frac{\partial}{\partial t} \Psi(\mathbf{r}, \Omega, t) + \hat{L} \Psi(\mathbf{r}, \Omega, t) = \hat{K} \Psi(\mathbf{r}, \Omega, t) - \sum_j \frac{\partial C_j(\mathbf{r}, t)}{\partial t} \tilde{\chi}_j$$

$$\frac{\partial C_j(\mathbf{r}, t)}{\partial t} = -\lambda_j C_j(\mathbf{r}, t) + \sum_{g=1}^G \beta_j^g \mathbf{v}_g(\mathbf{r}) \Sigma_f^g(\mathbf{r}, t) \Phi_g(\mathbf{r}, t)$$

$$\Psi^{(3,2)}(\mathbf{r}, \Omega, t) = \sum_k \Psi_k^{(3,2)}(\mathbf{r}, \Omega, t) = \sum_k \left[\sum_{l=0}^2 \Phi_k^{r,(l)}(\mathbf{r}, \Omega) I_k^{r,(l)}(t) + \sum_{l=0}^1 \Phi_k^{z,(l)}(\mathbf{r}, \Omega) I_k^{z,(l)}(t) \right]$$

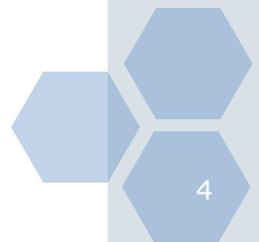
$$\left\{ \begin{array}{l} \mathbf{v}_{inv,k} \frac{d}{dt} \Phi_k^r(t) - \hat{\Lambda}^r \Phi_k^r(t) - \hat{\Lambda}^z (\mathbf{R}_k \Phi_k^r(t)) + \Sigma_k \Phi_k^r(t) + \frac{4}{V_k} \sum_j \frac{d}{dt} \mathbf{C}_{j,k}^{r,(0)}(t) = 0 \\ \frac{d}{dt} \mathbf{C}_{j,k}^{r,(0)}(t) = -\lambda_j \mathbf{C}_{j,k}^{r,(0)}(t) + \beta_{j,k}^{r,(0)}(t) \Phi_k^r(t) \end{array} \right.$$

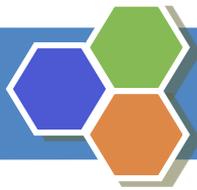




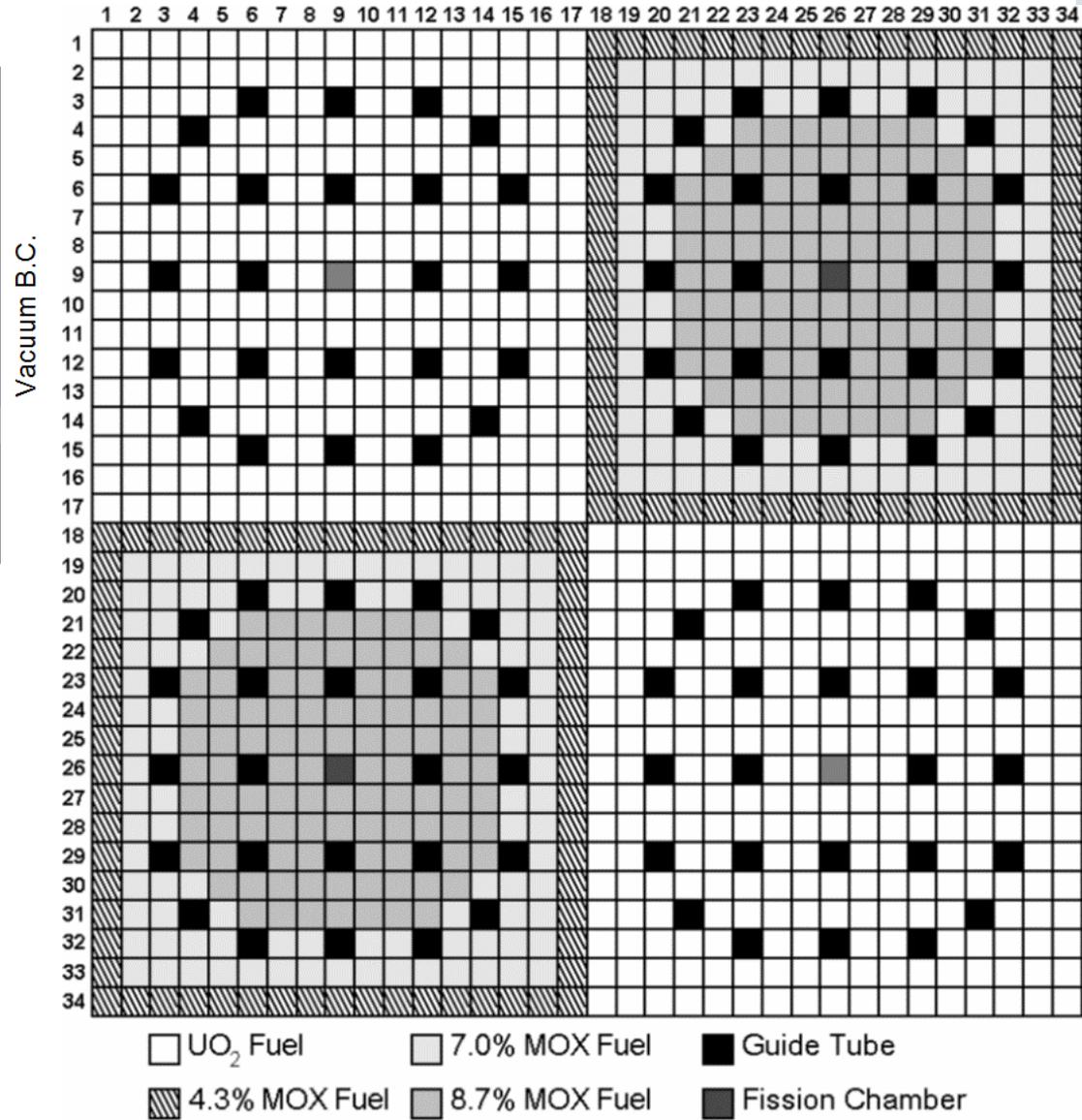
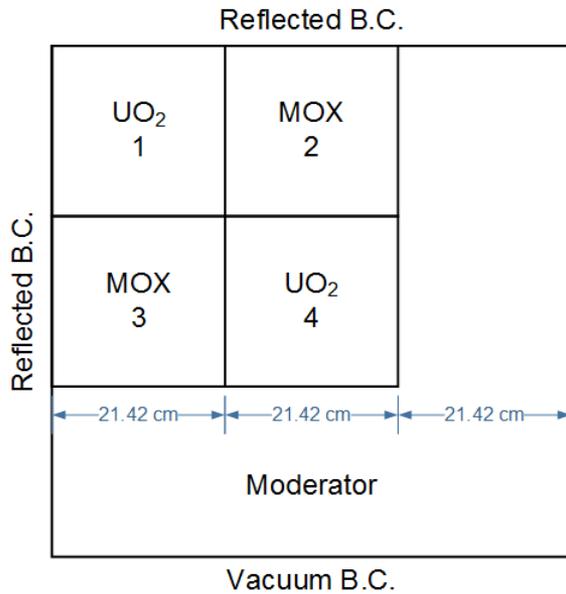
Спецификация модели бенчмарка C5G7-TD

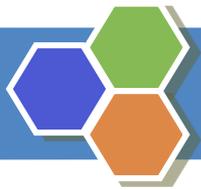
- Бенчмарк C5G7 представляет собой модель небольшого легко-водного реактора (ЛВР) с шестнадцатью топливными сборками (ТС): восемь сборок с топливом из UO_2 и восемь сборок со смешанным оксидным топливом (МОХ), окруженных водяным отражателем. Имеется квадратная радиальная симметрия в двумерной (2-D) конфигурации,



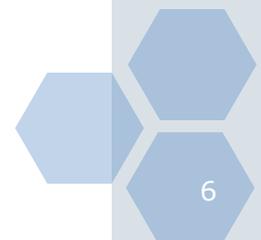
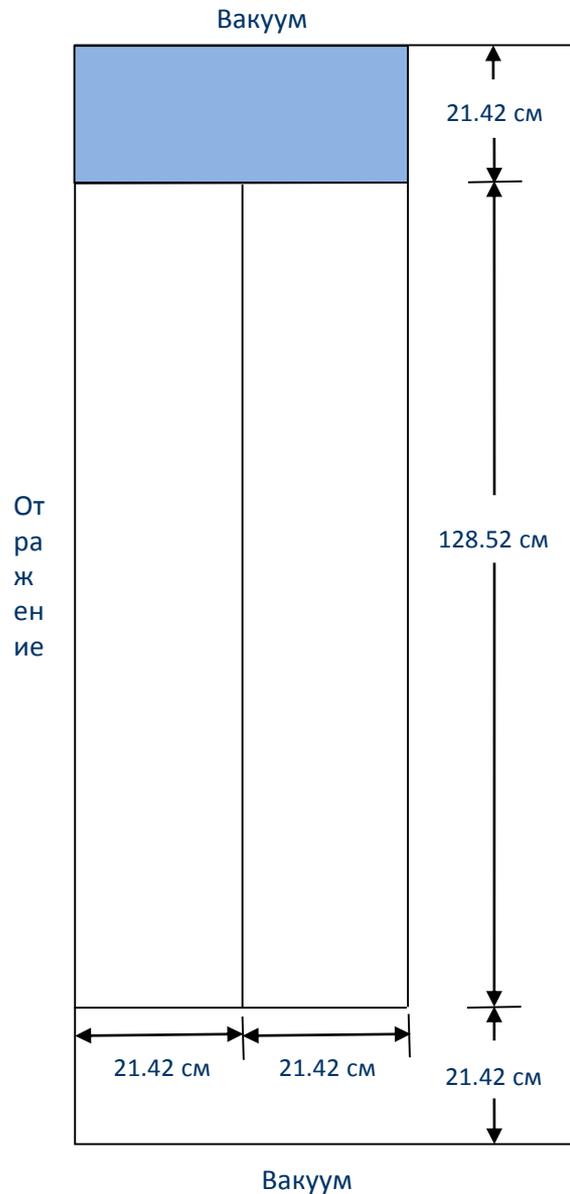


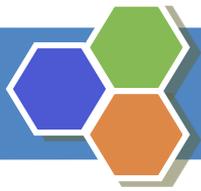
2D C5G7 benchmark





Модифицированная 3-D конфигурация бенчмарка C5G7





Описание рассчитанных тестов

- **Упражнение TD4**

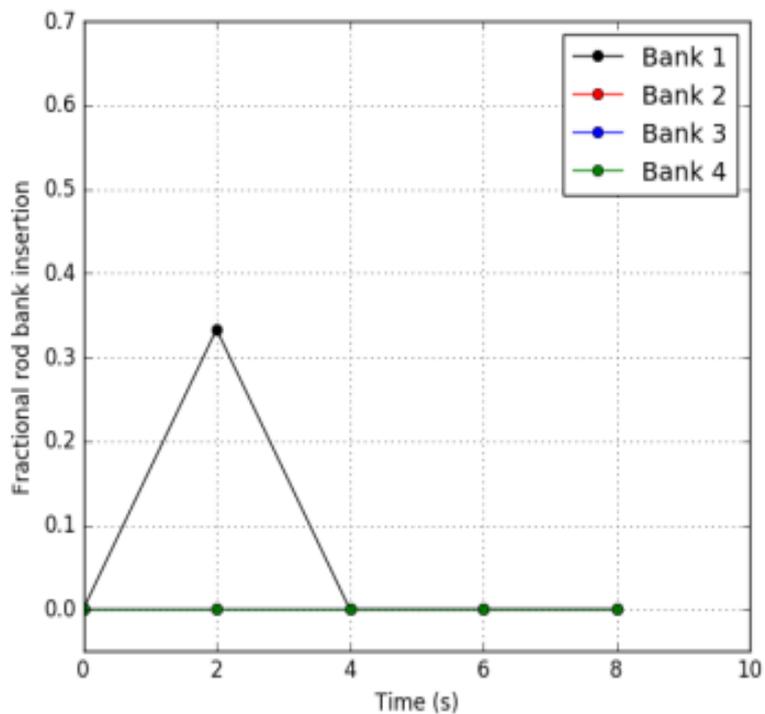
- ❖ TD4-1: ввод/вывод контрольных стержней группы 1.
- ❖ TD4-2: ввод/вывод контрольных стержней группы 3.
- ❖ TD4-3: ввод/вывод контрольных стержней группы 1 и 3.
- ❖ TD4-4: ввод/вывод контрольных стержней групп 3, и 4.
- ❖ TD4-5: ввод/вывод контрольных стержней групп 1 и 3.

- **Упражнение TD5**

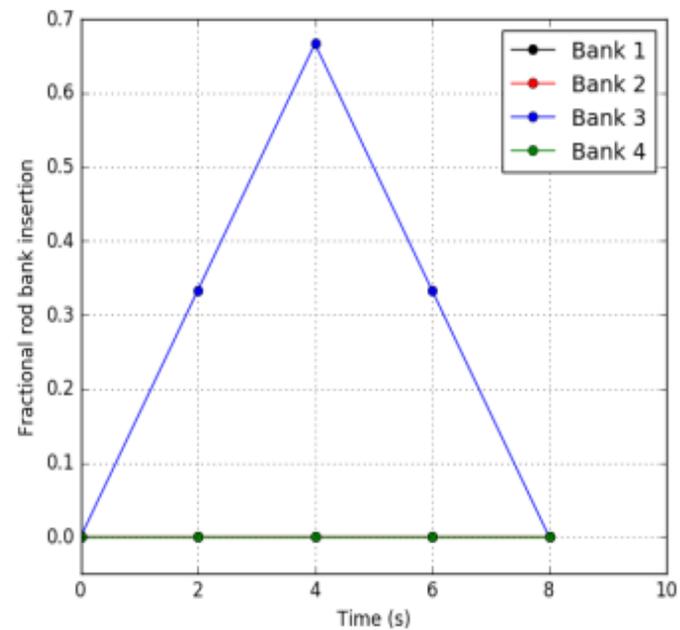
- ❖ TD5-1: изменение плотности замедлителя в ТС № 1 и № 3.
- ❖ TD5-2: изменение плотности замедлителя в ТС № 1 и № 3.
- ❖ TD5-3: изменение плотности замедлителя в ТС № 1. 3 и 4.
- ❖ TD5-4: изменение плотности замедлителя в ТС № 2. 3 и 4.

- Все тесты бенчмарка C5G7-TD являются “слепыми”, т.е. результаты расчетов этих тестов, пригодные для сравнения, появятся только после определенного времени, когда большая часть, участвующих в расчетах программ рассчитают эти тесты.

Движение контрольных стержней, TD4

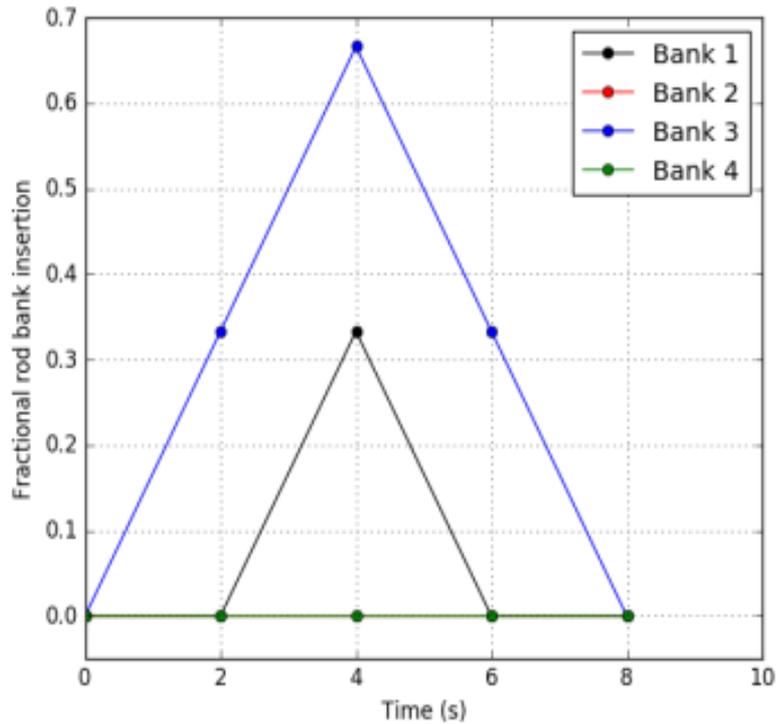


TD4-1

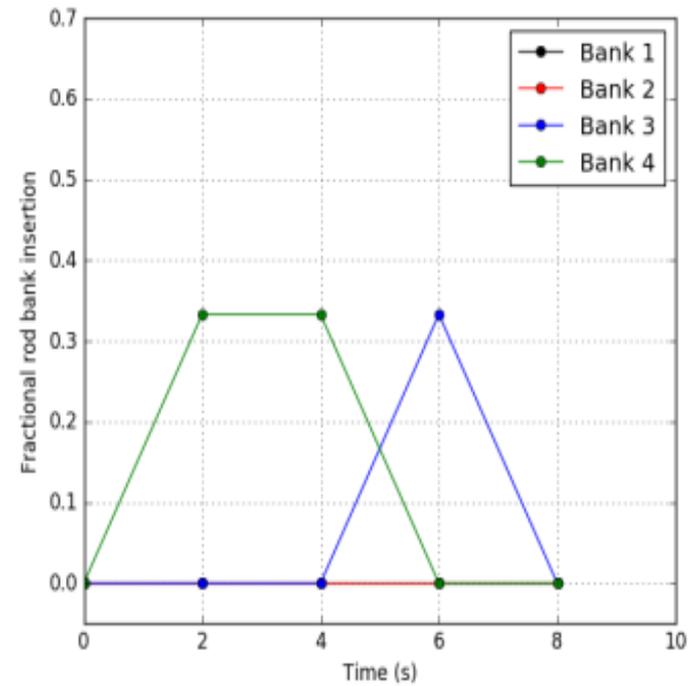


TD4-2

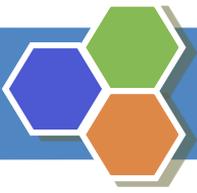
Движение контрольных стержней , TD4



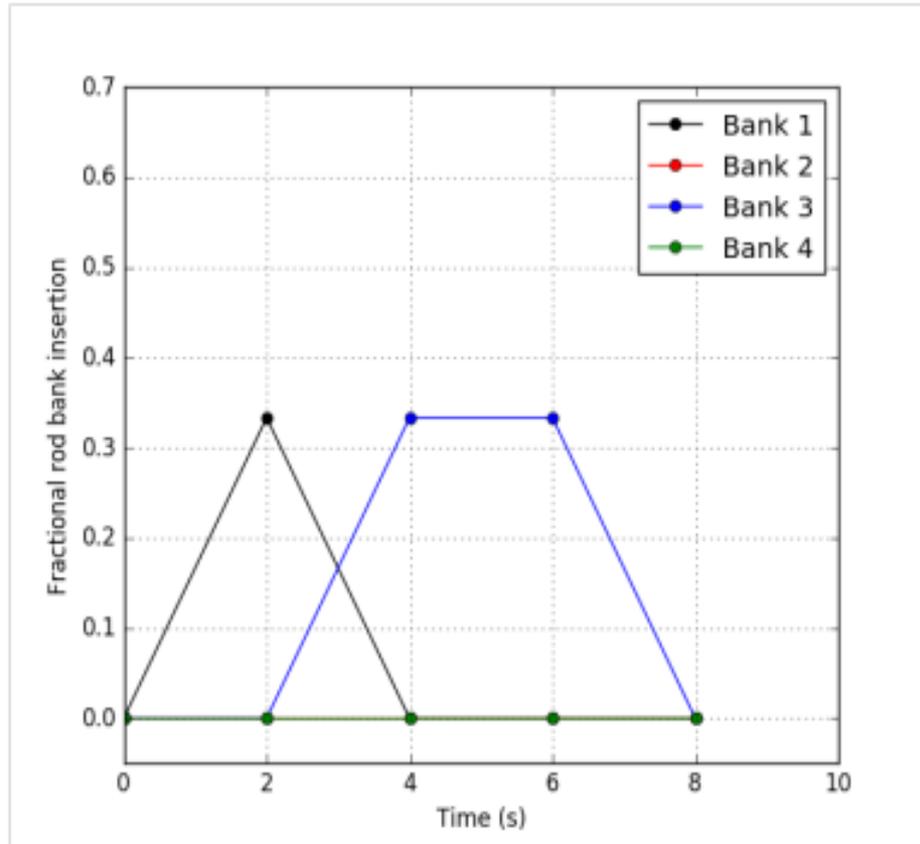
TD4-3



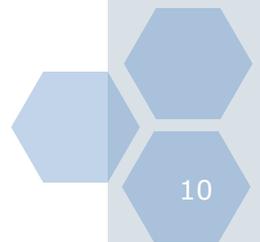
TD4-4

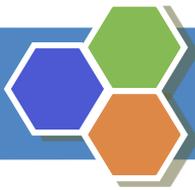


Движение контрольных стержней , TD4

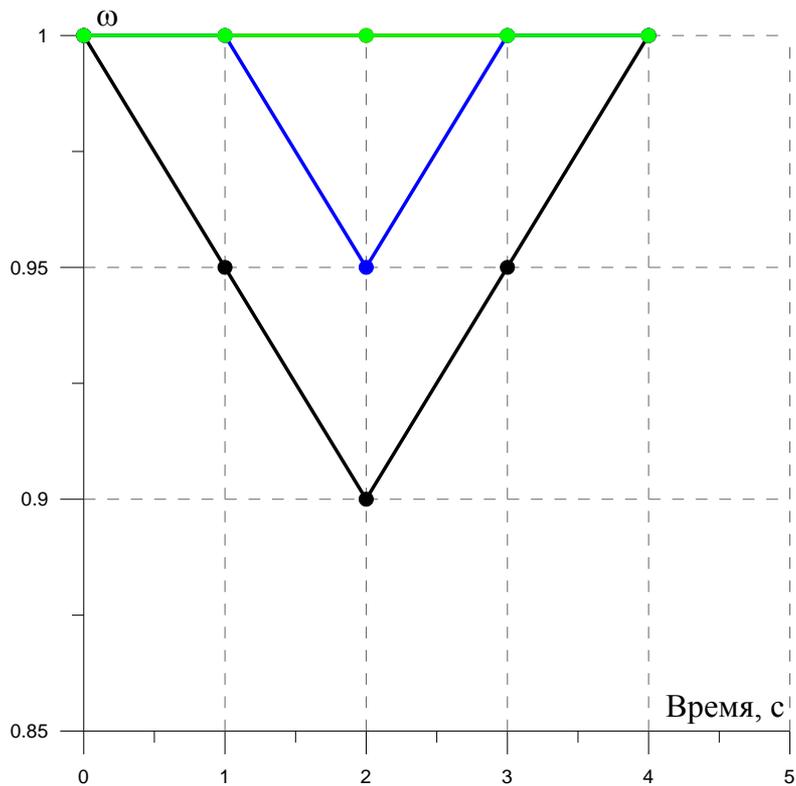


TD4-5

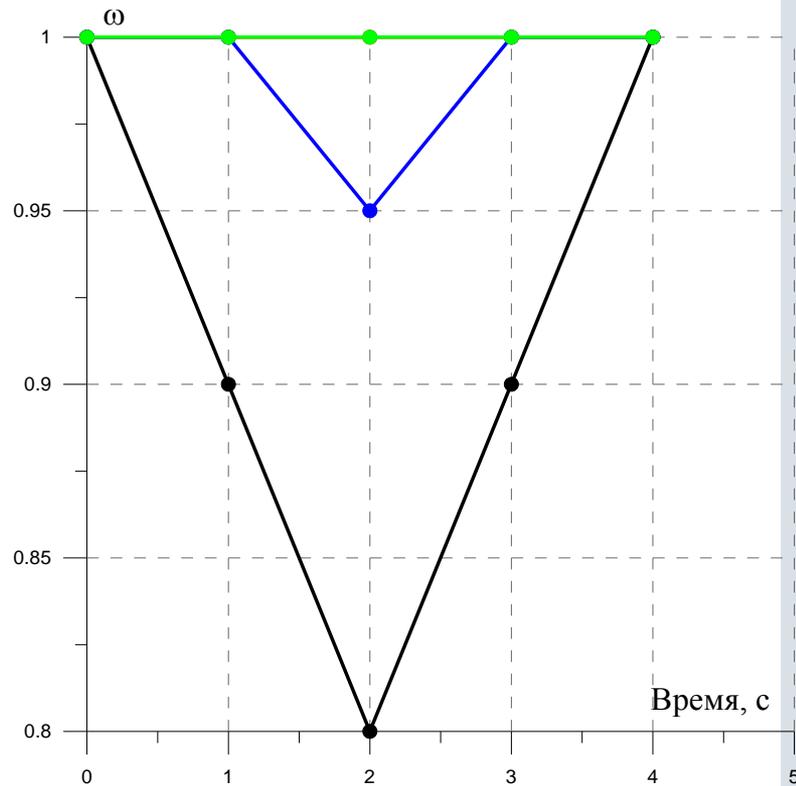




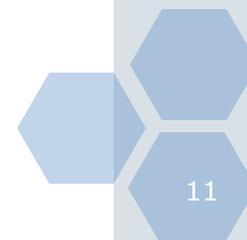
Изменение плотности замедлителя, TD5

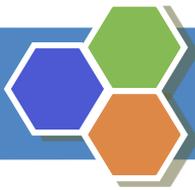


TD5-1

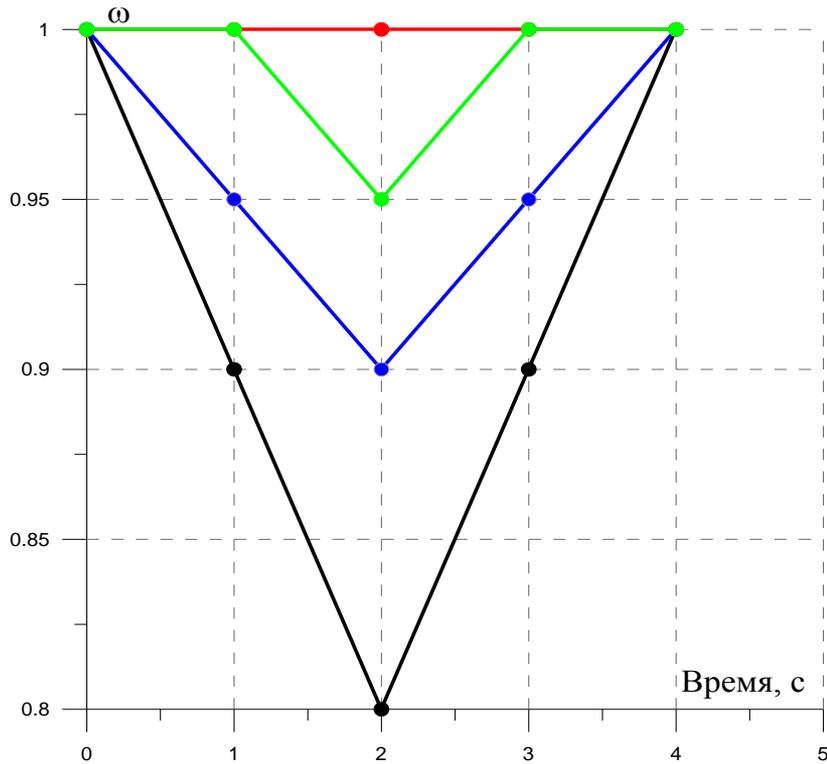


TD5-2

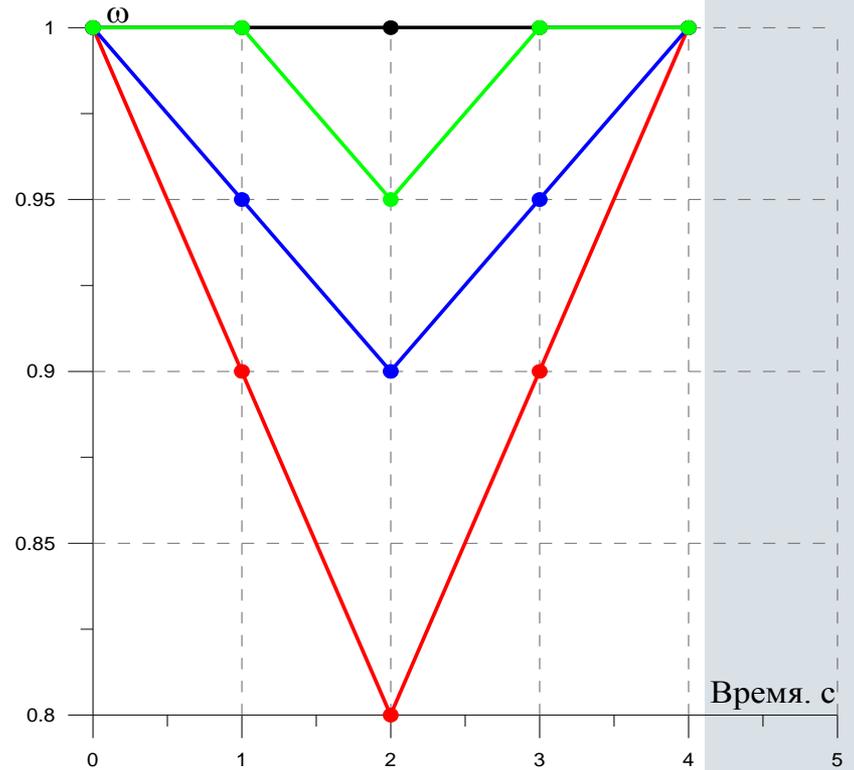




Изменение плотности замедлителя, TD5

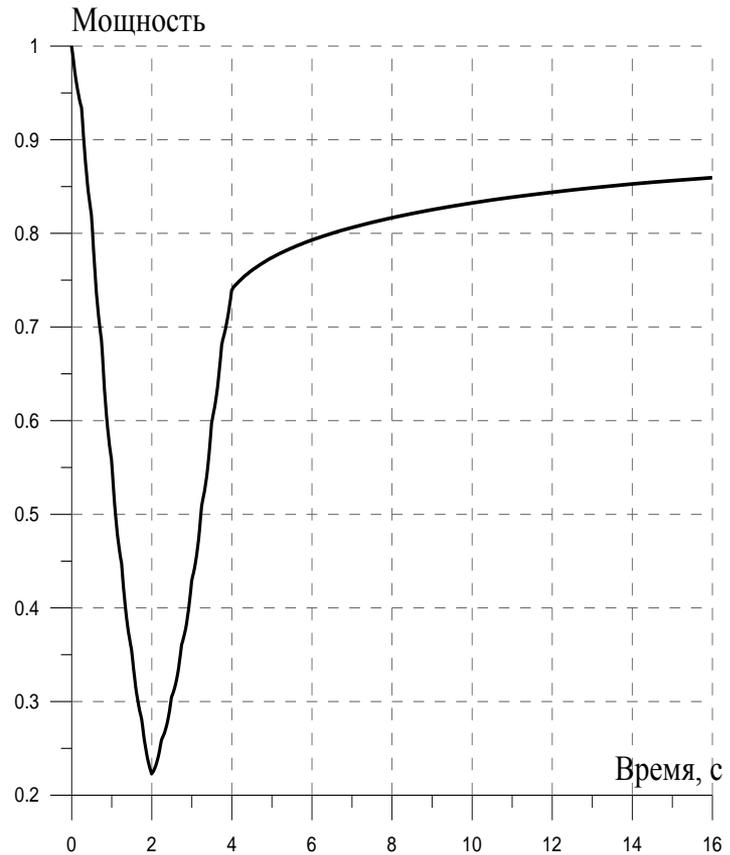
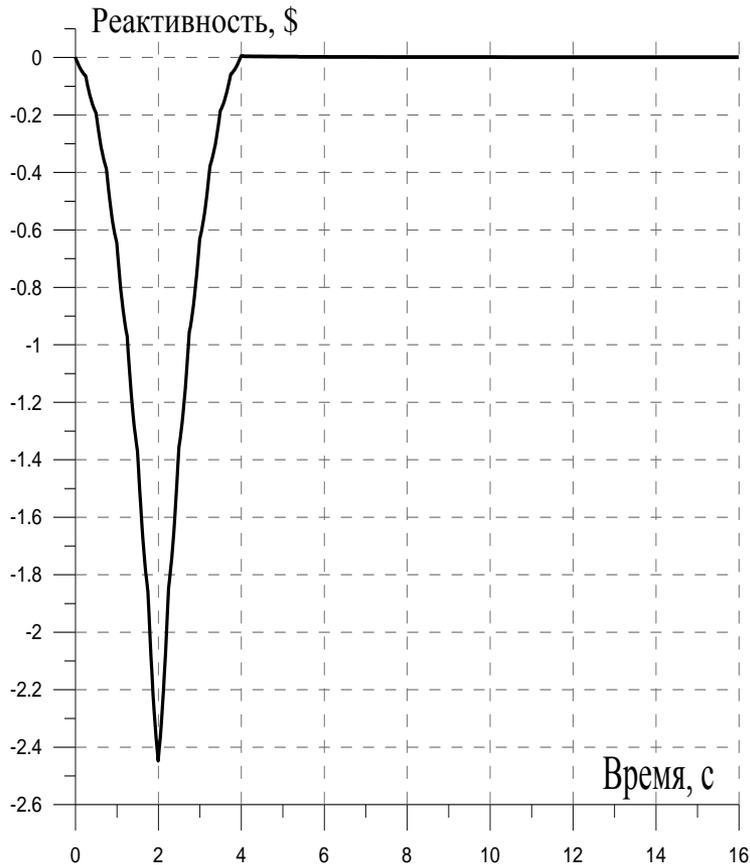


TD5-3

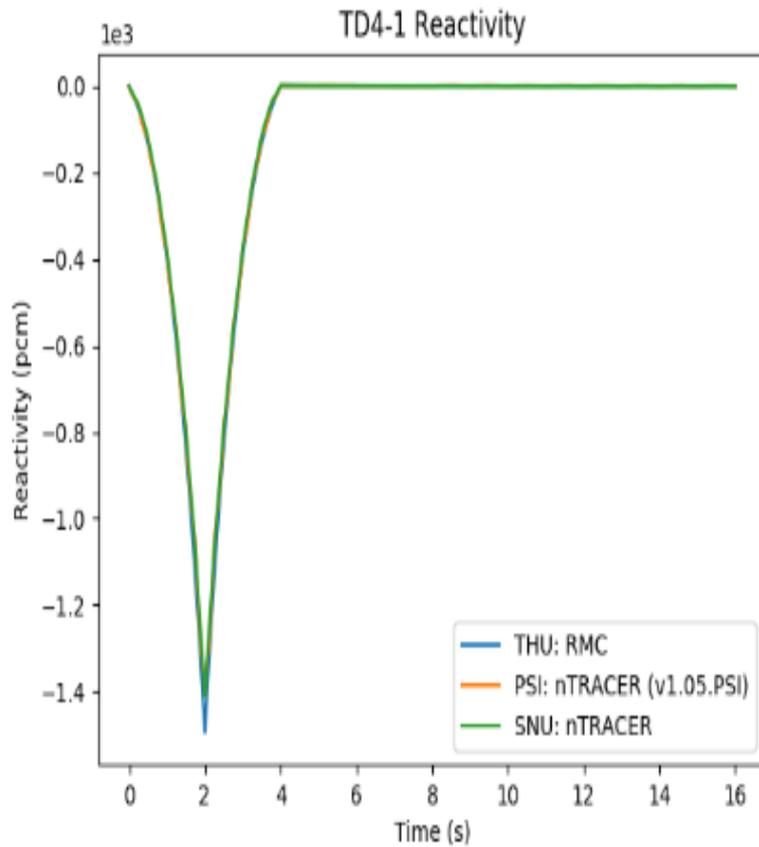


TD5-4

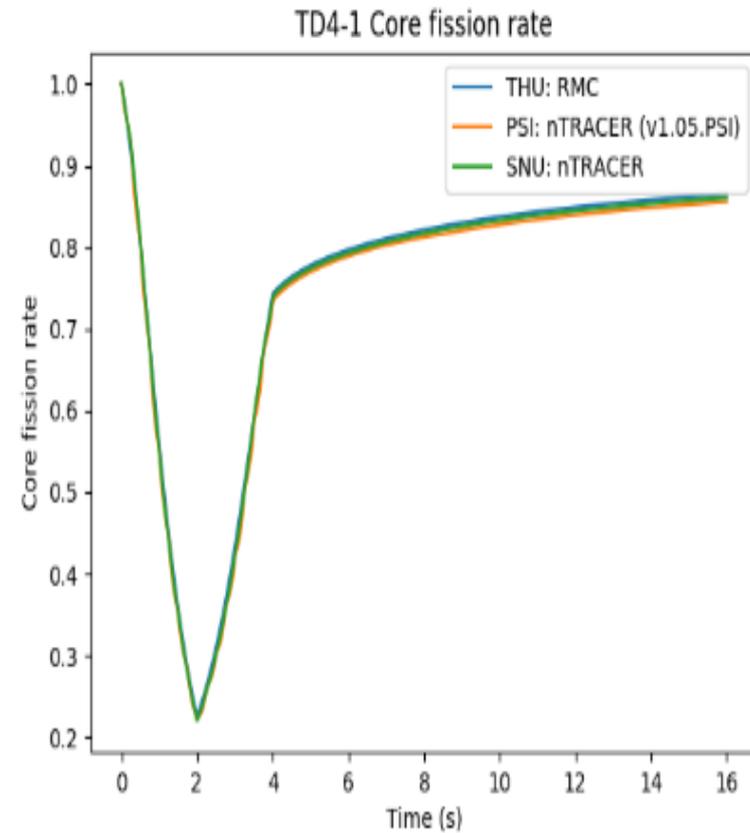
Тест TD4-1: а) Реактивность в \$; б) Полная нормированная мощность



Тест TD4-1: а) Реактивность в рсм; б) Полная нормированная мощность

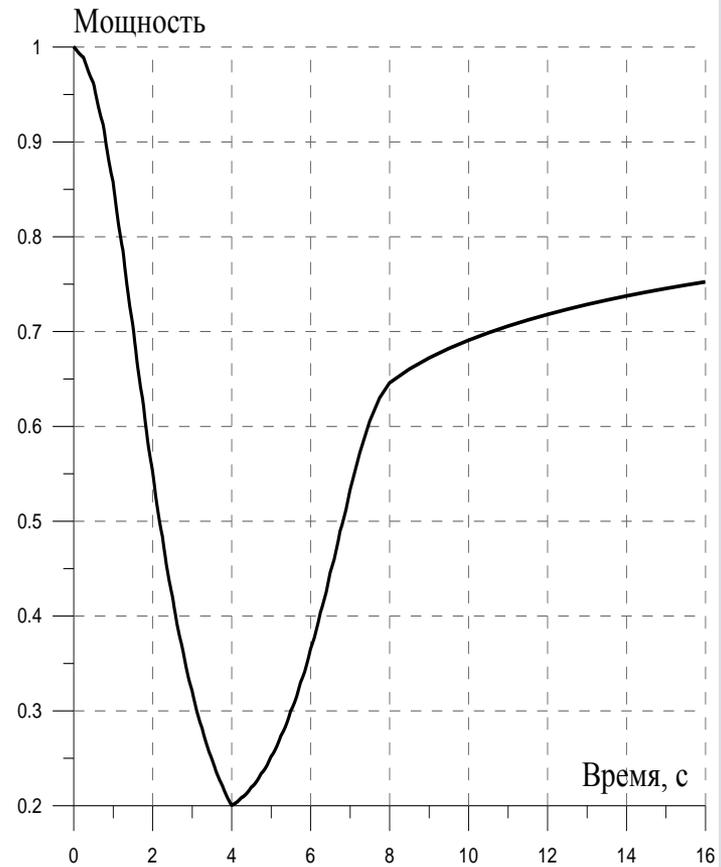
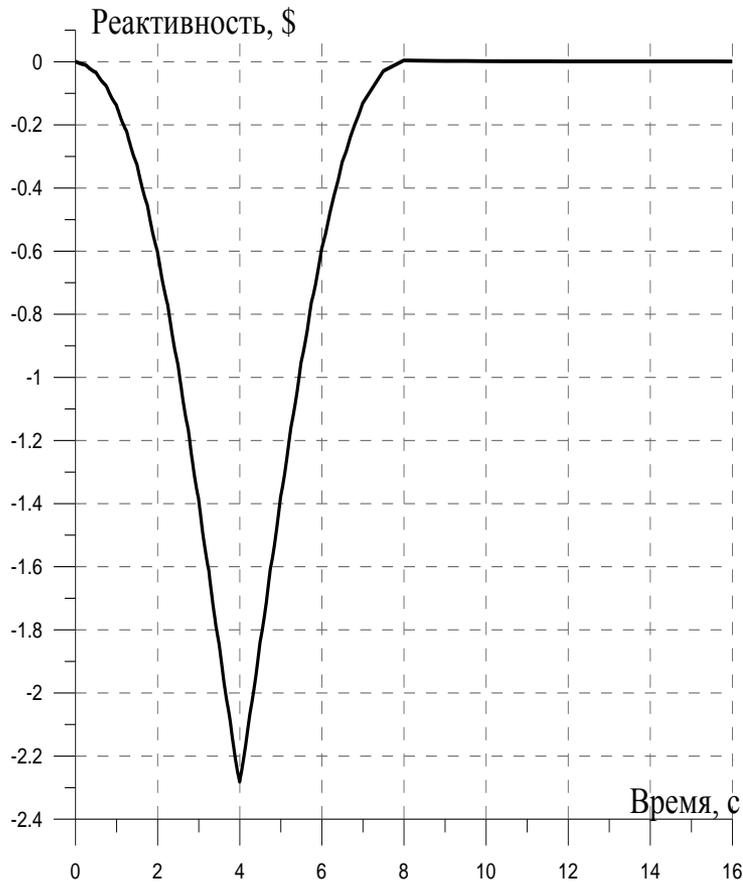


a)

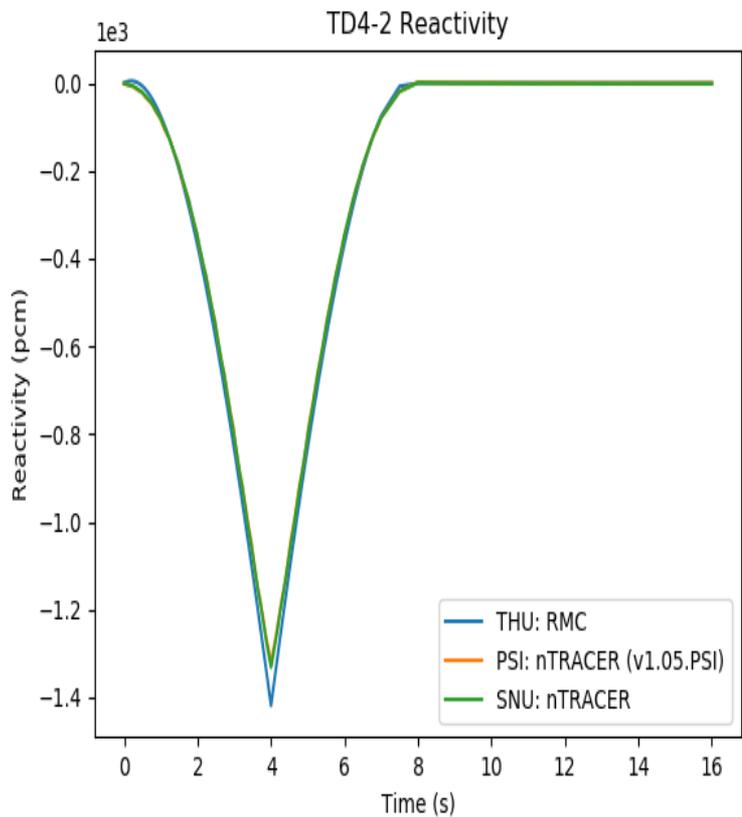


b)

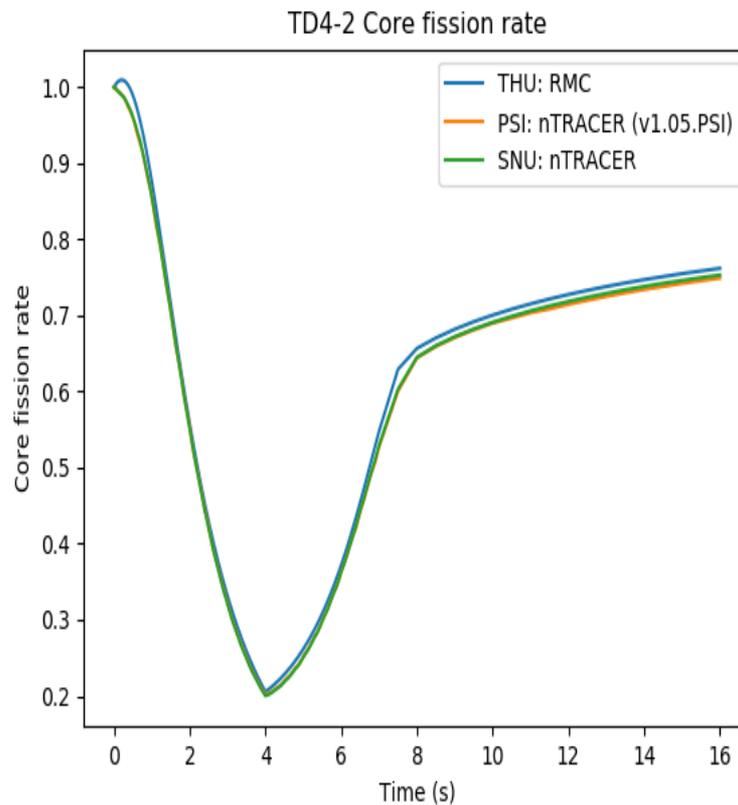
Тест TD4-2: а) Реактивность в \$; б) Полная нормированная мощность



Тест TD4-2: а) Реактивность в рсм; б) Полная нормированная мощность



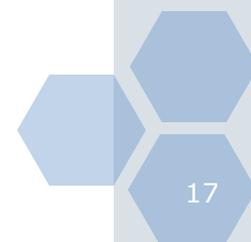
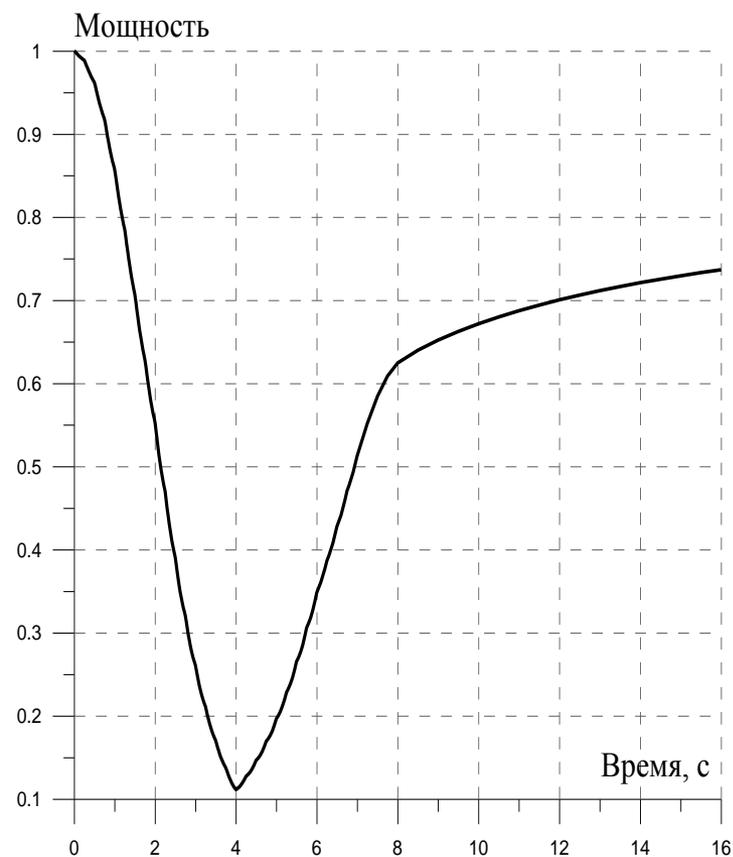
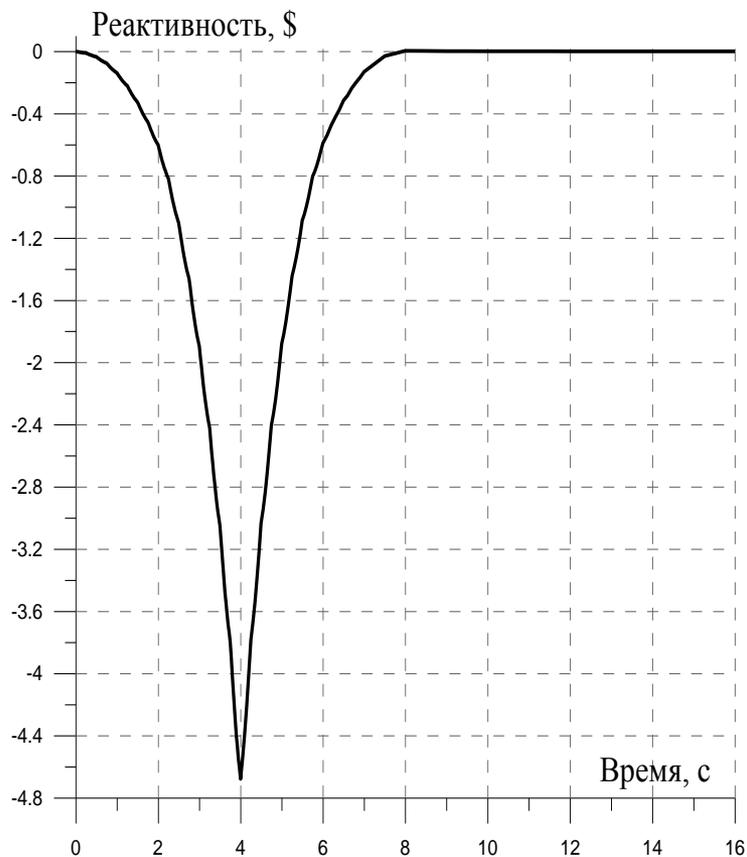
a)



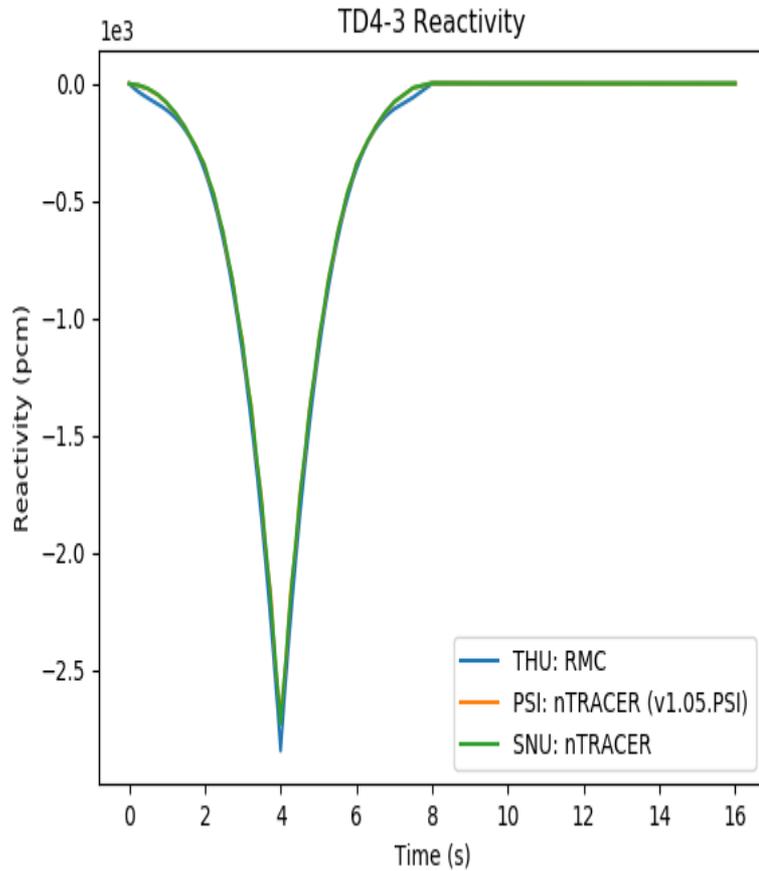
b)



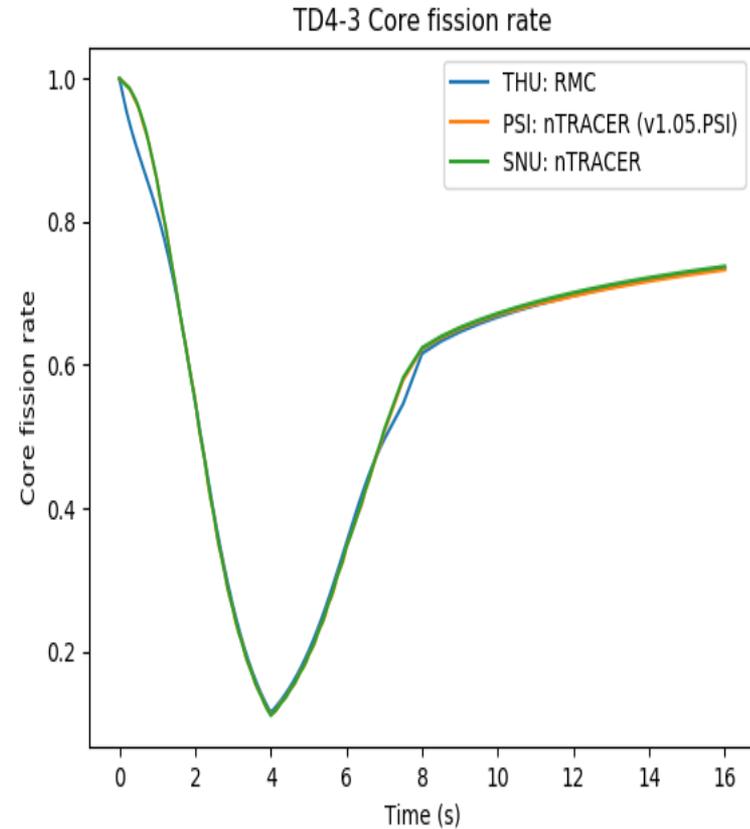
Тест TD4-3: а) Реактивность в \$; б) Полная нормированная мощность



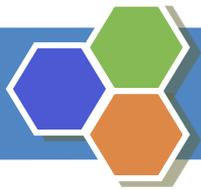
Тест TD4-3: а) Реактивность в рсм; б) Полная нормированная мощность



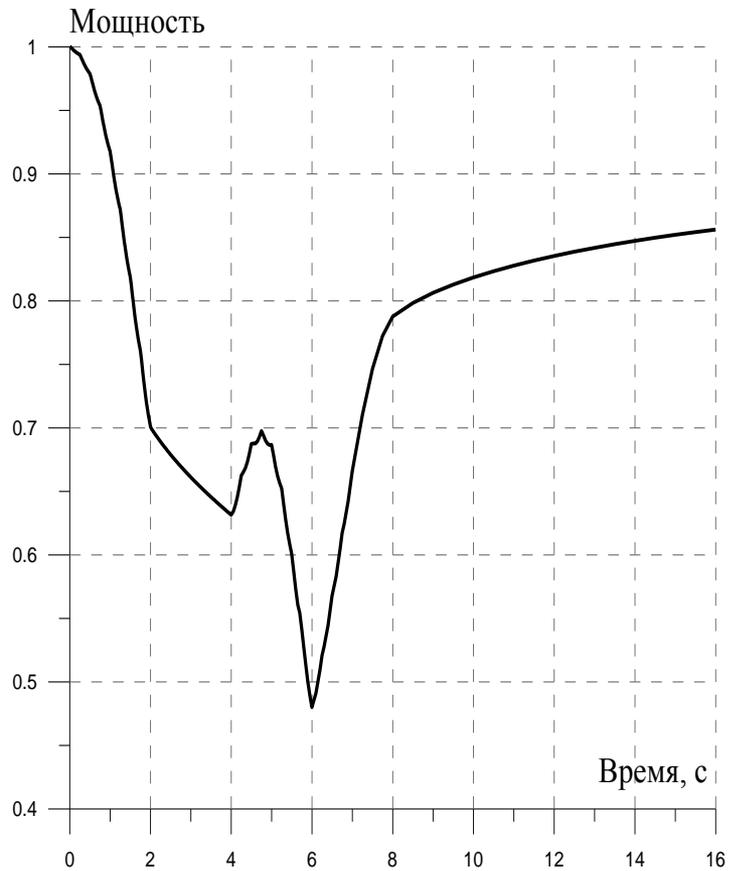
a)



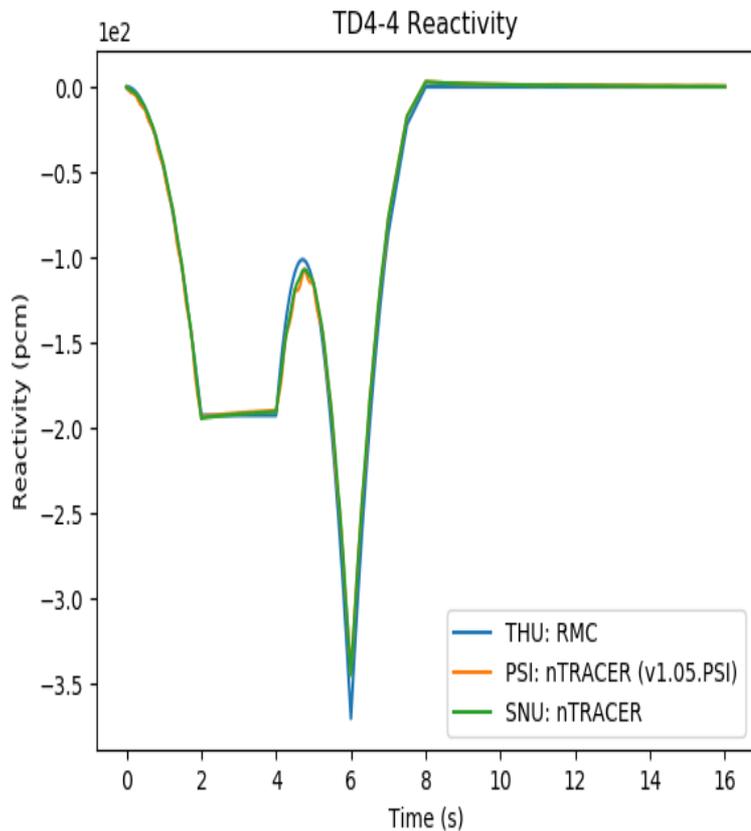
b)



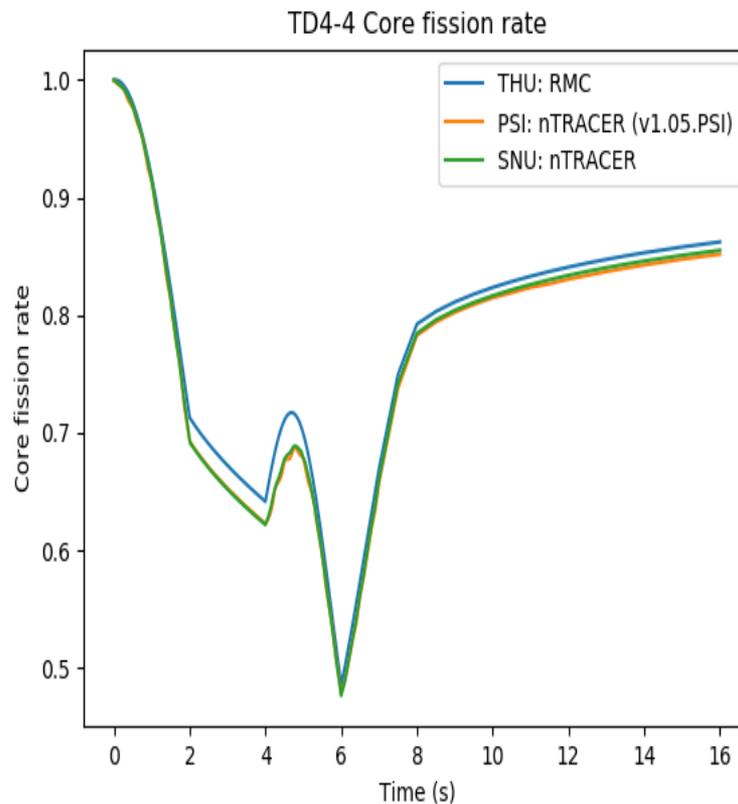
Тест TD4-4: а) Реактивность в \$; б) Полная нормированная мощность



Тест TD4-4: а) Реактивность в рсм; б) Полная нормированная мощность

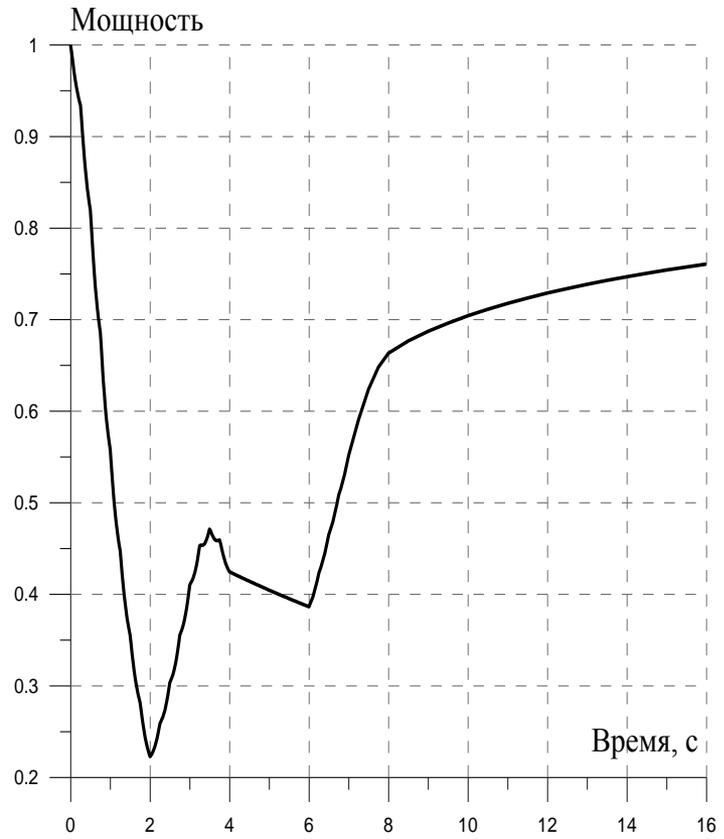
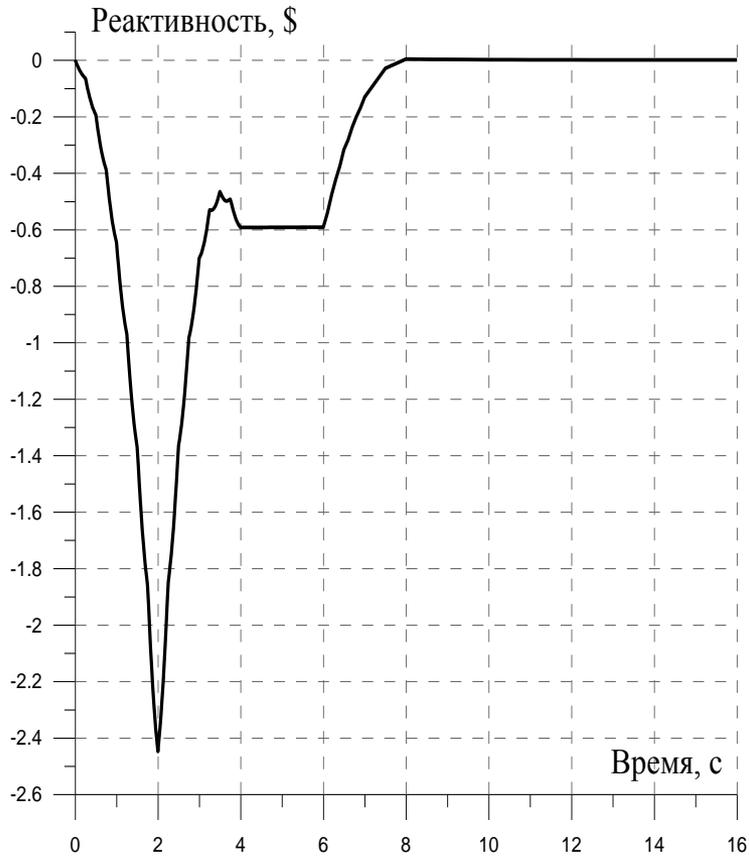


a)

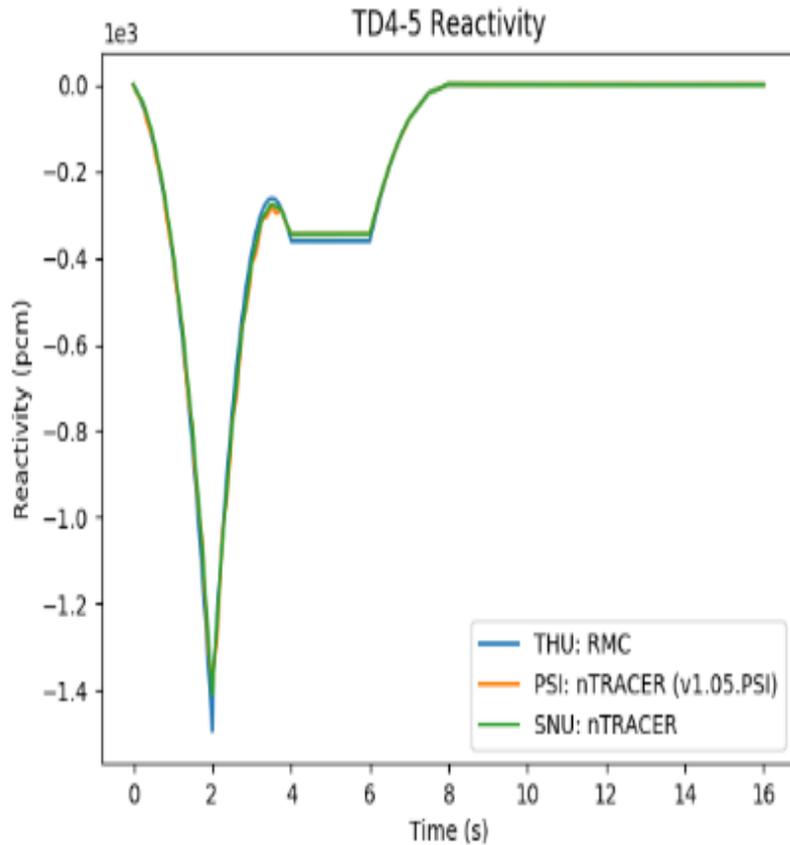


b)

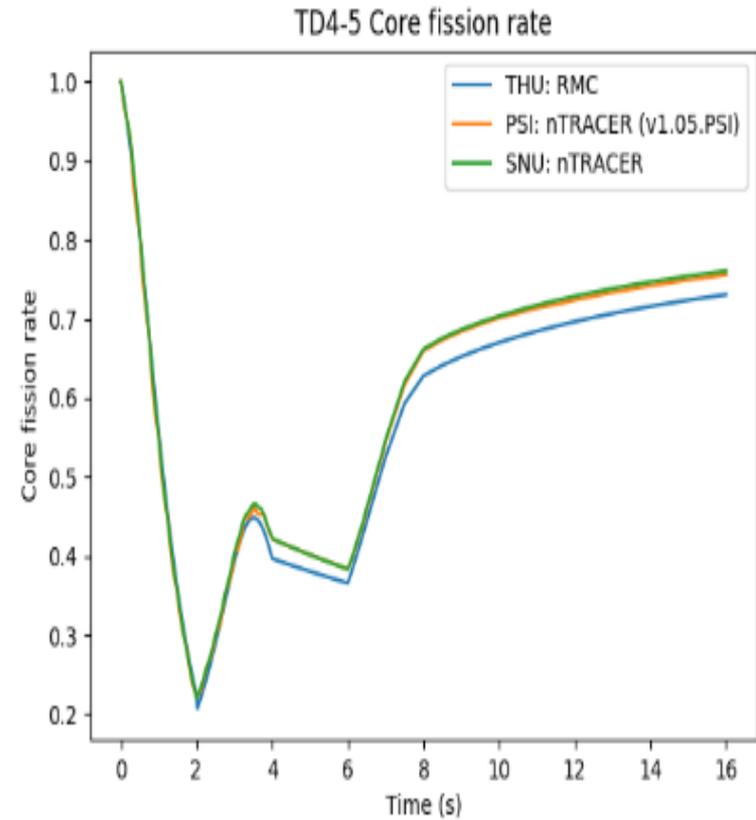
Тест TD4-5: а) Реактивность в \$; б) Полная нормированная мощность



Тест TD4-5: а) Реактивность в рсм; б) Полная нормированная мощность

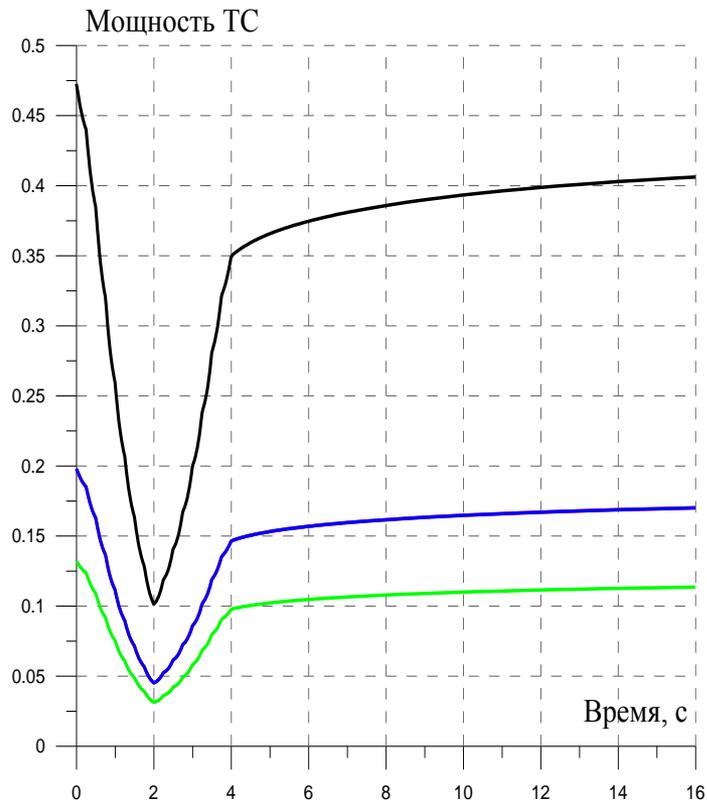


a)

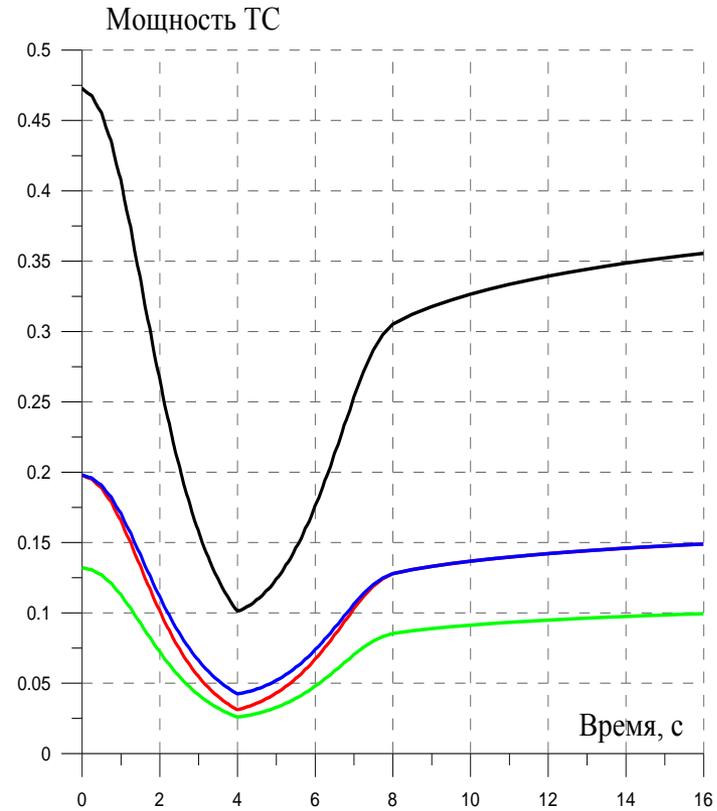


b)

Упражнение TD4: Полная мощность в топливных сборках



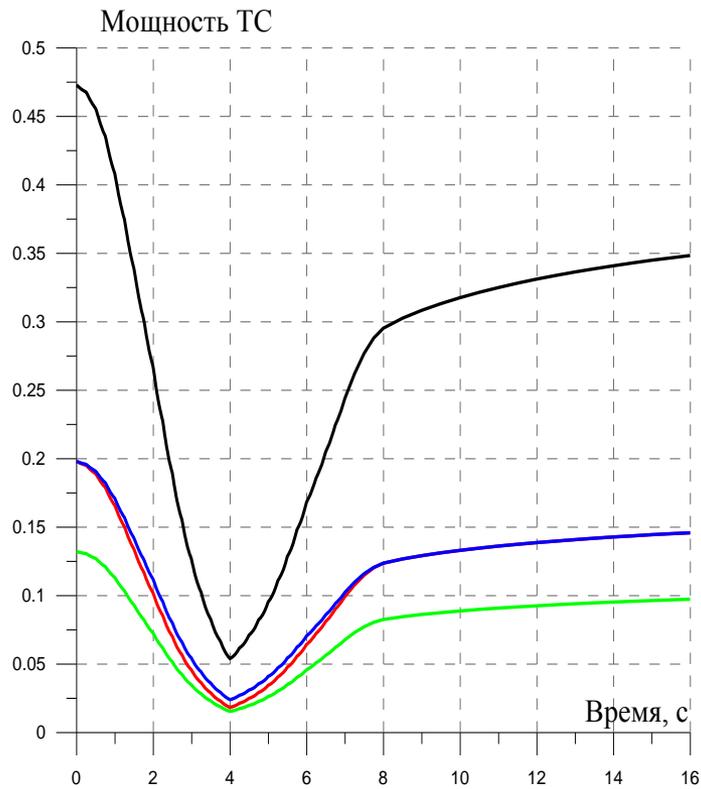
а) Тест TD4-1;



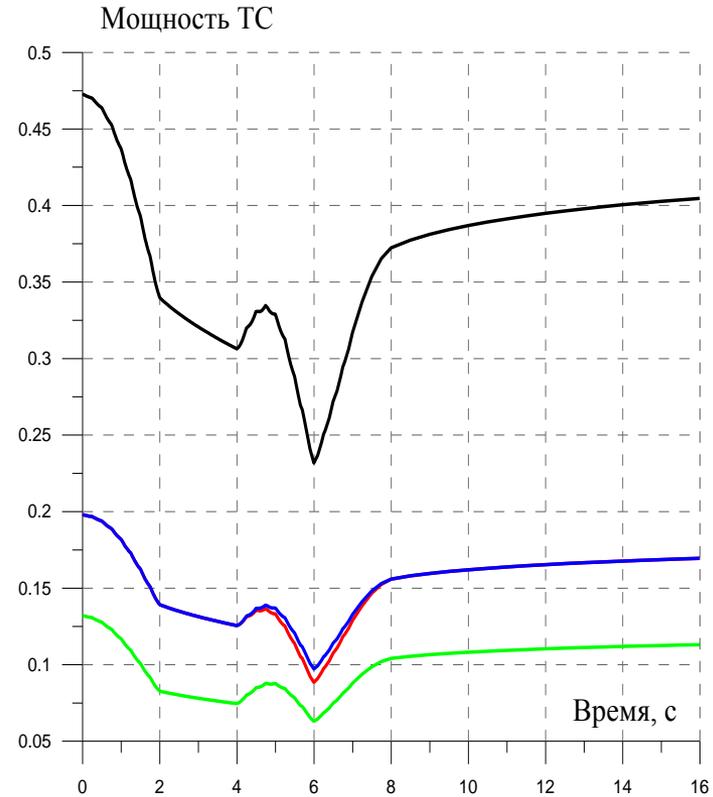
б) Тест TD4-2;

— - TC-1; — - TC-2; — - TC-3; — - TC-4

Упражнение Т4: Полная мощность в топливных сборках



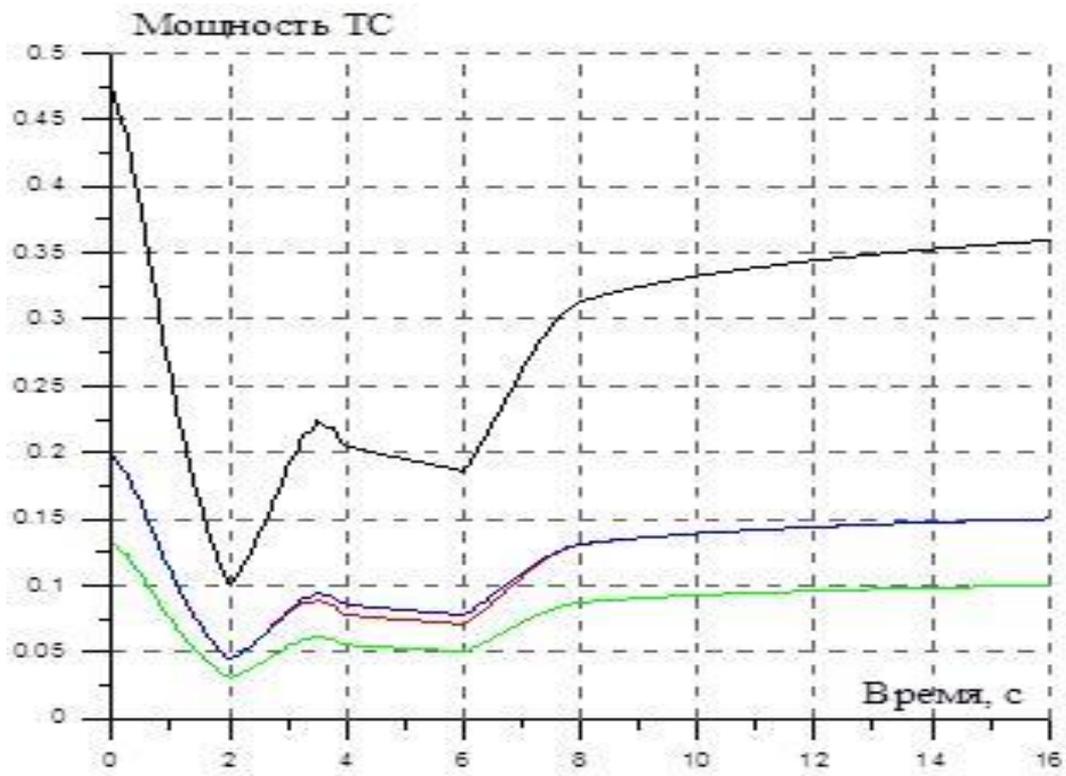
в) Тест TD4-3;



г) Тест TD4-4;

— - ТС-1; — - ТС-2; — - ТС-3; — - ТС-4

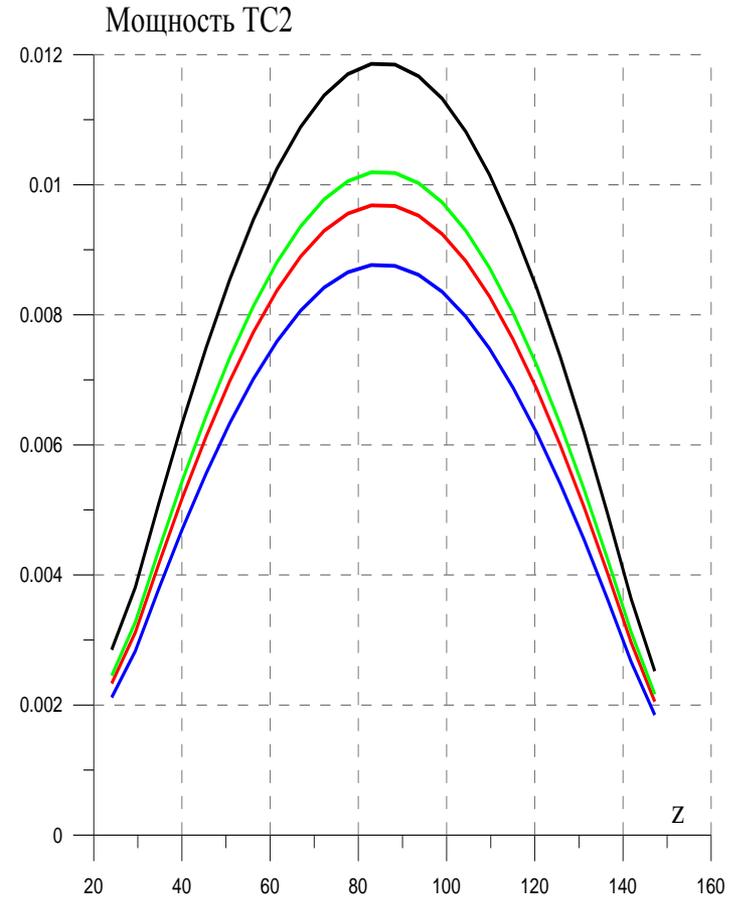
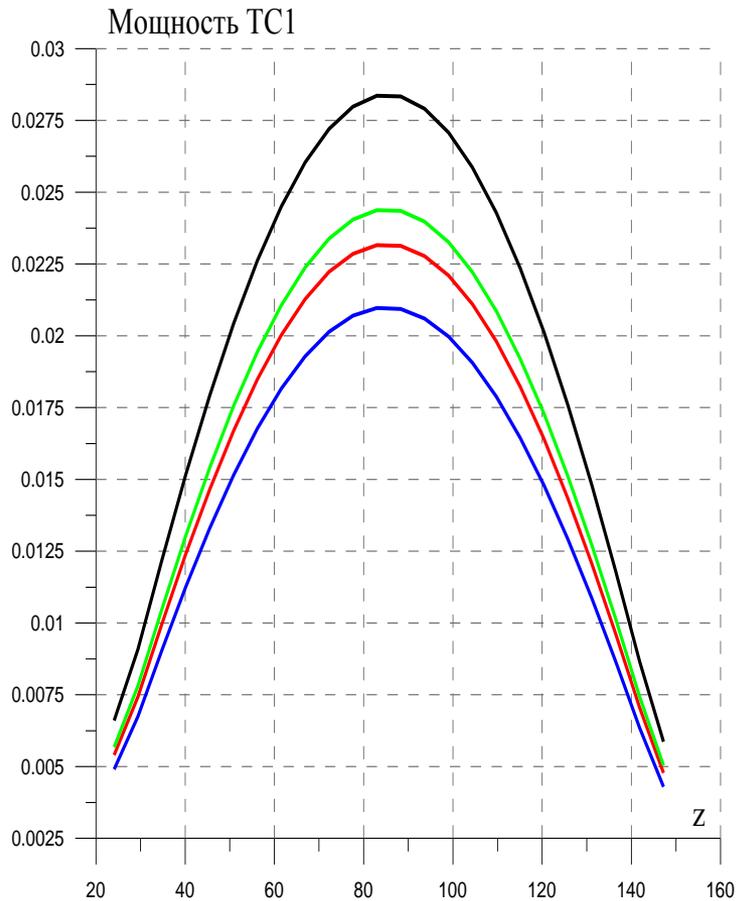
Упражнение Т4: Полная мощность в топливных сборках



д) Тест TD4-5

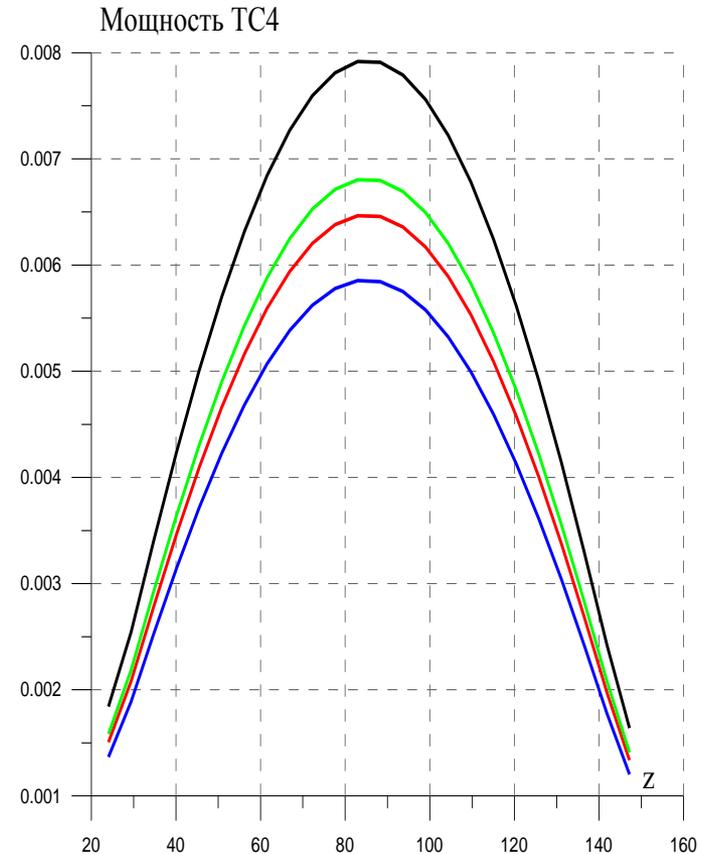
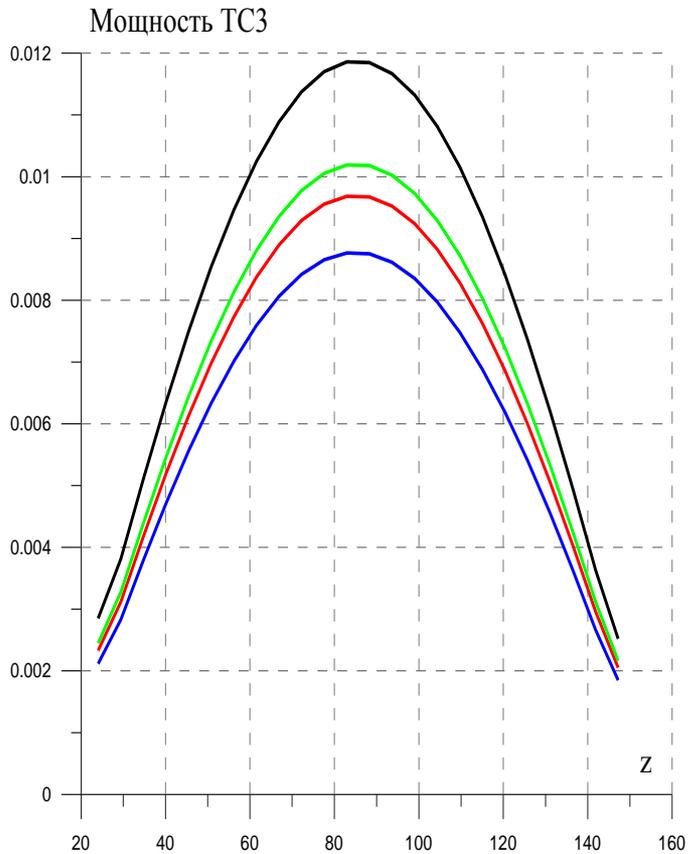
— - TC-1; — - TC-2; — - TC-3; — - TC-4

Зависимость от продольной координаты z мощности топливных сборок, тест TD4-1



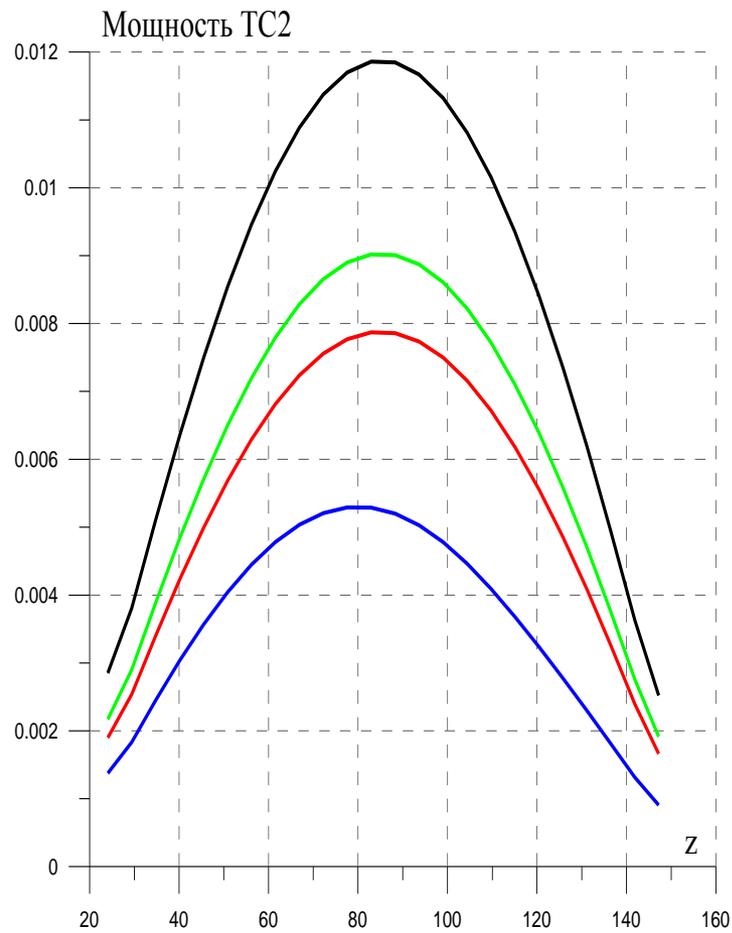
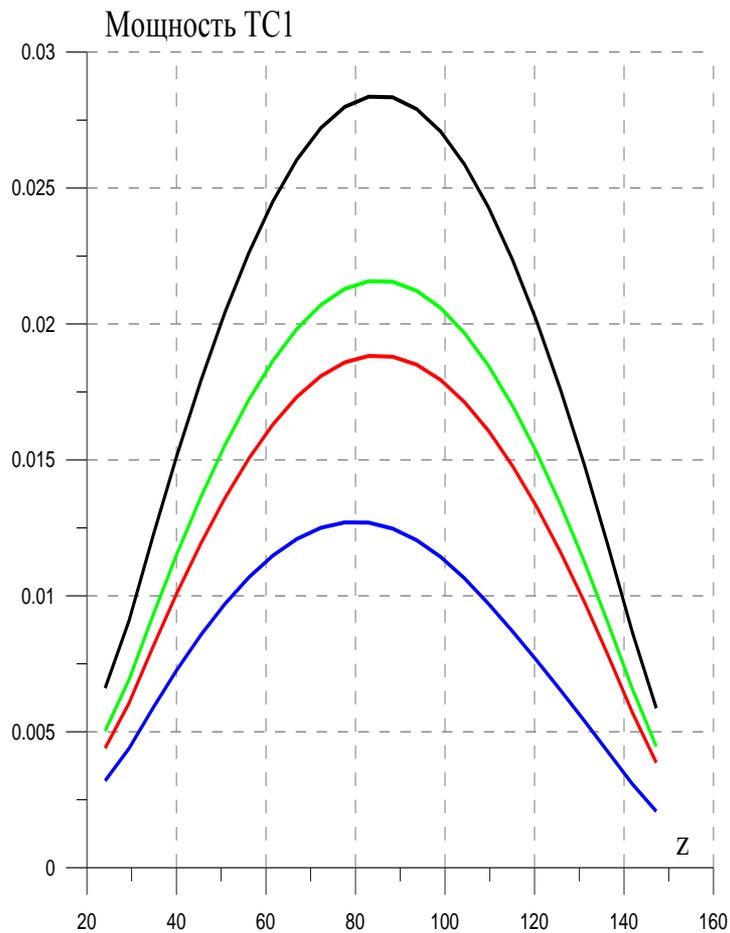
— - $t=0$ с; — - $t=2$ с; — - $t=4$ с; — - $t=16$ с

Зависимость от продольной координаты z мощности топливных сборок, тест TD4-1



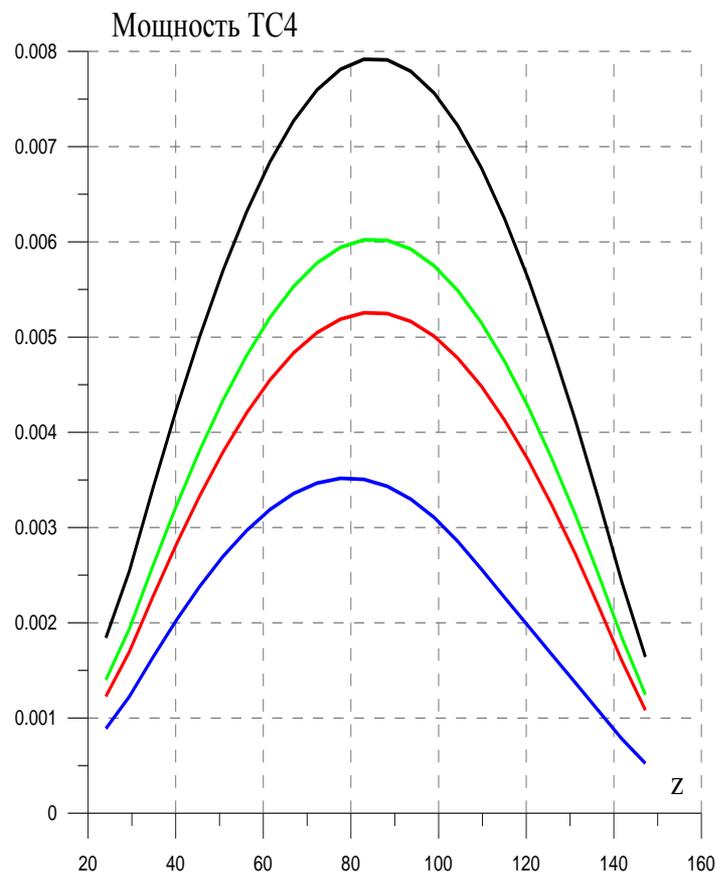
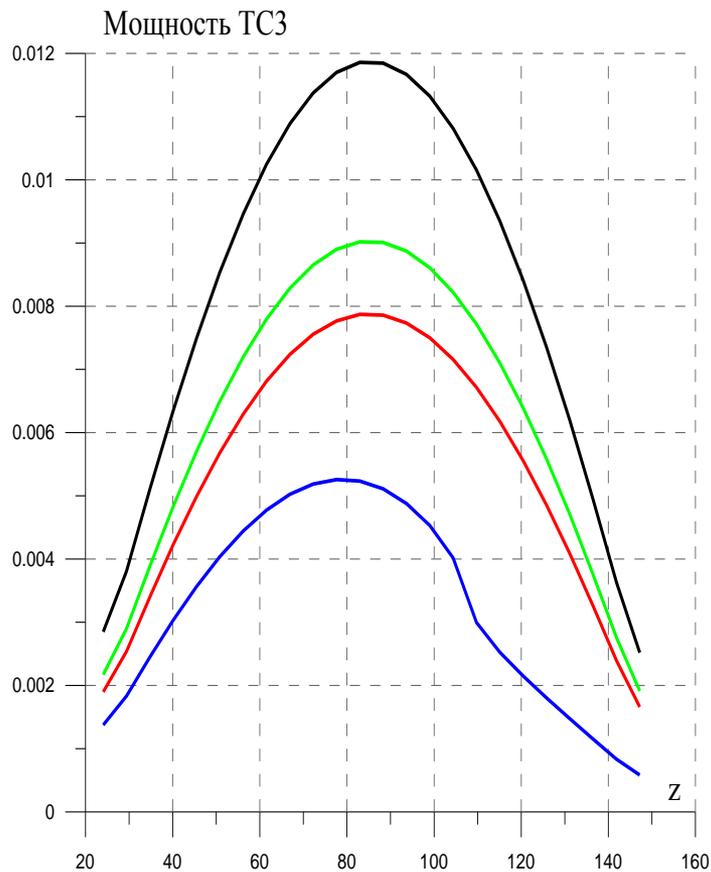
— - $t=0$ с; — - $t=2$ с; — - $t=4$ с; — - $t=16$ с

Зависимость от продольной координаты z мощности топливных сборок, тест TD4-5



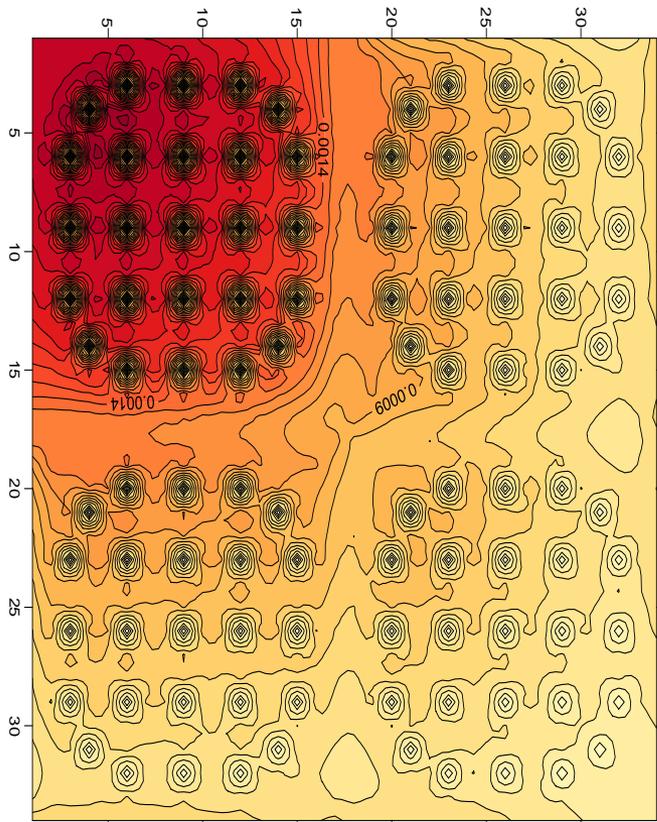
— - $t=0$ с; — - $t=4$ с; — - $t=8$ с; — - $t=16$ с

Зависимость от продольной координаты z мощности топливных сборок, тест TD4-5

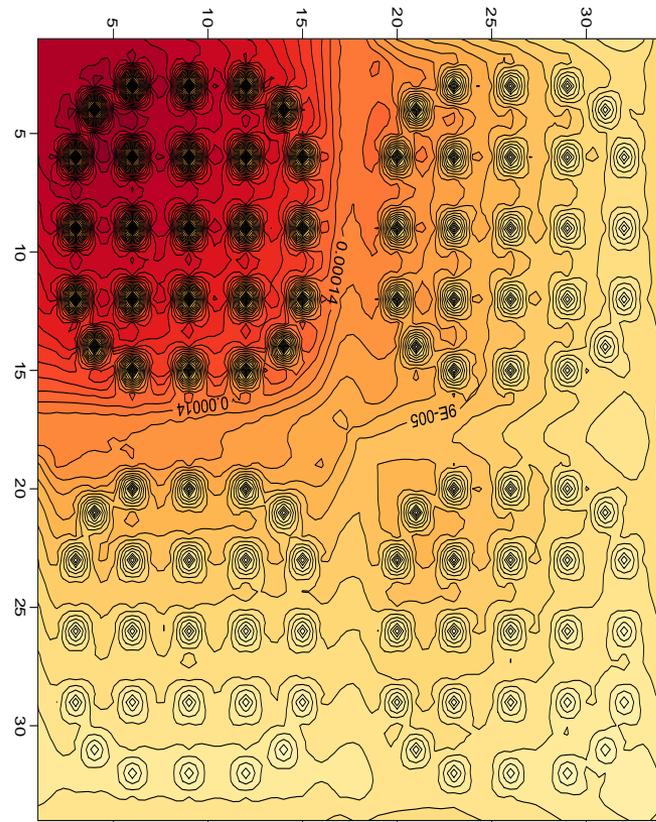
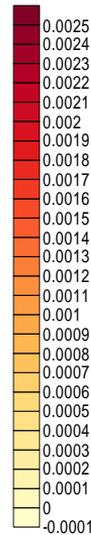


— - $t=0$ с; — - $t=4$ с; — - $t=8$ с; — - $t=16$ с

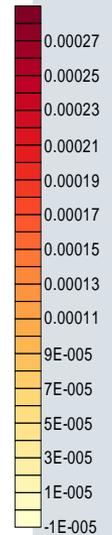
Распределения локальной по координатам x, y , интегральной по оси z мощности, TD4-3



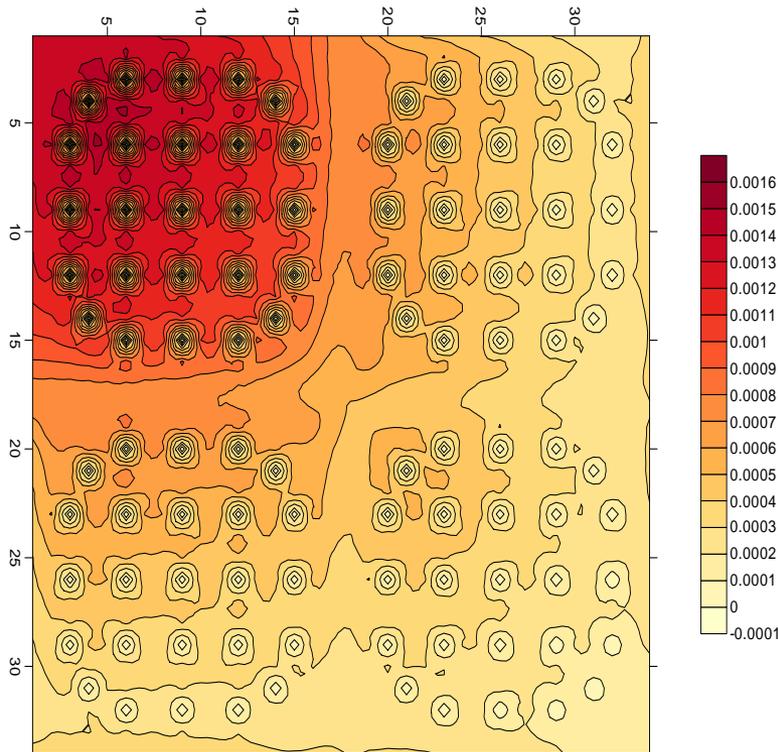
$t=0$ c



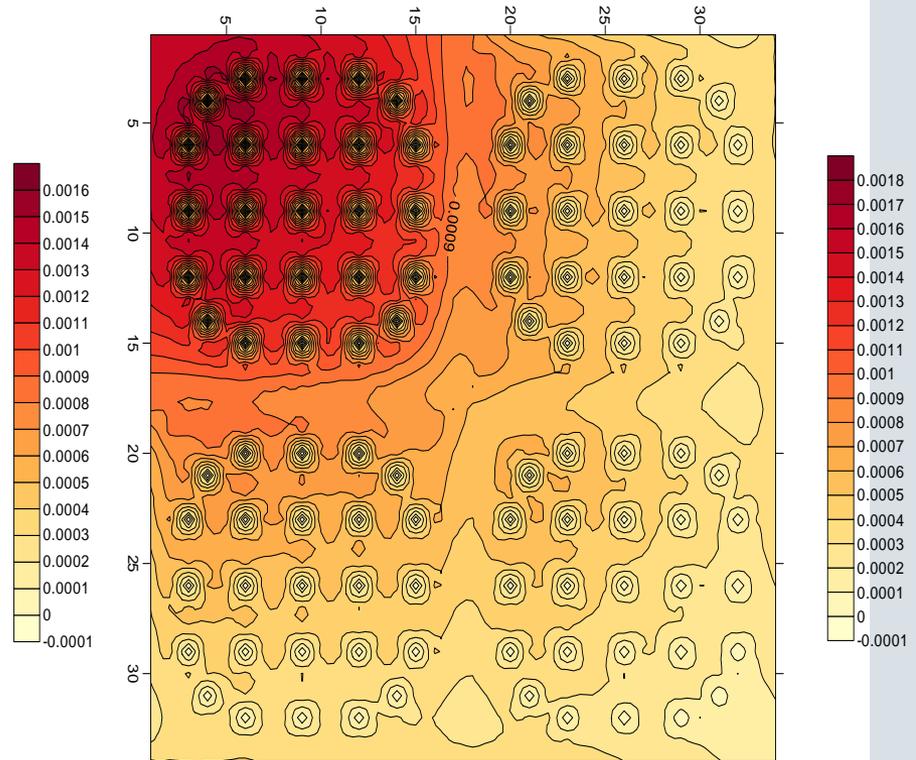
$t=4$ c



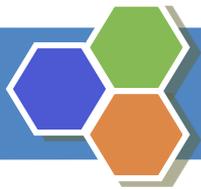
Распределения локальной по координатам x, y , интегральной по оси z мощности, TD4-3



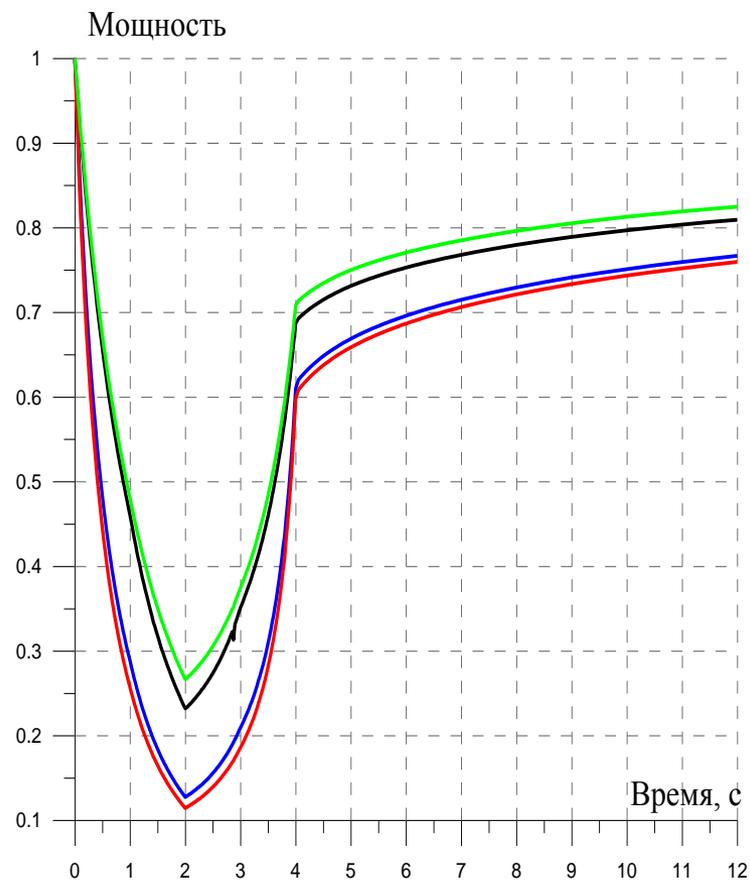
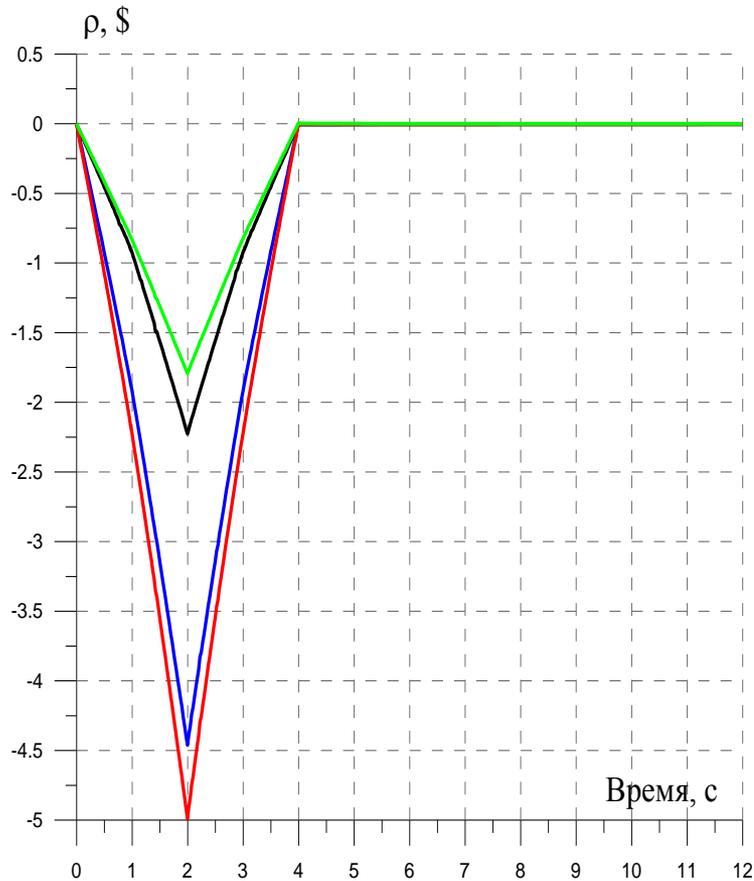
$t=8$ c



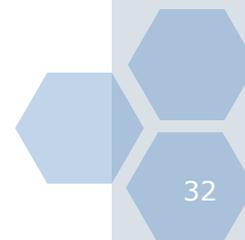
$t=16$ c



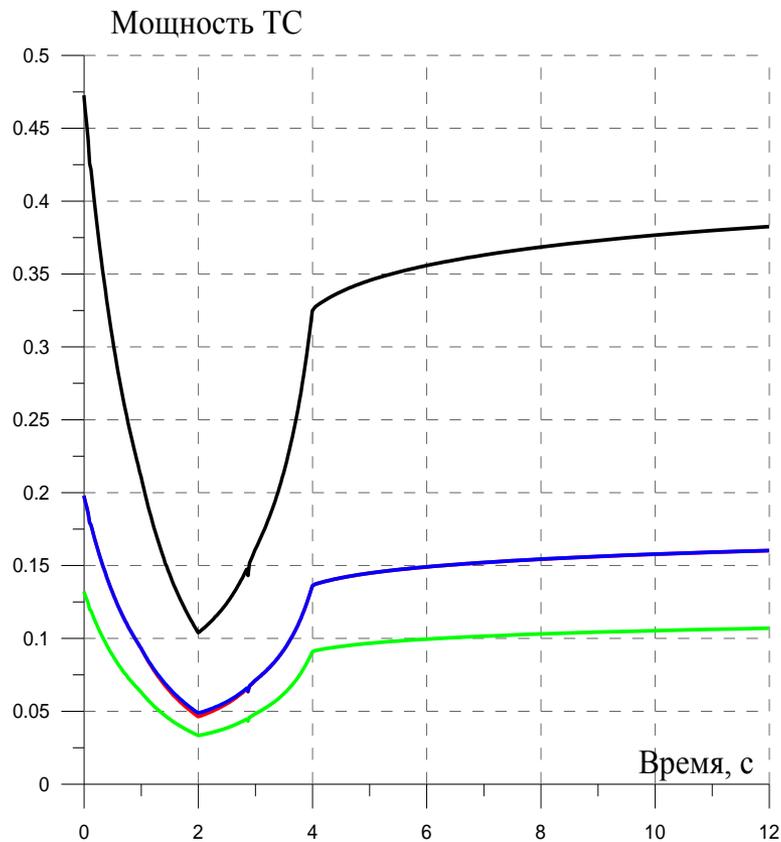
Упражнение TD5: а) Реактивность в \$; б) Полная нормированная мощность



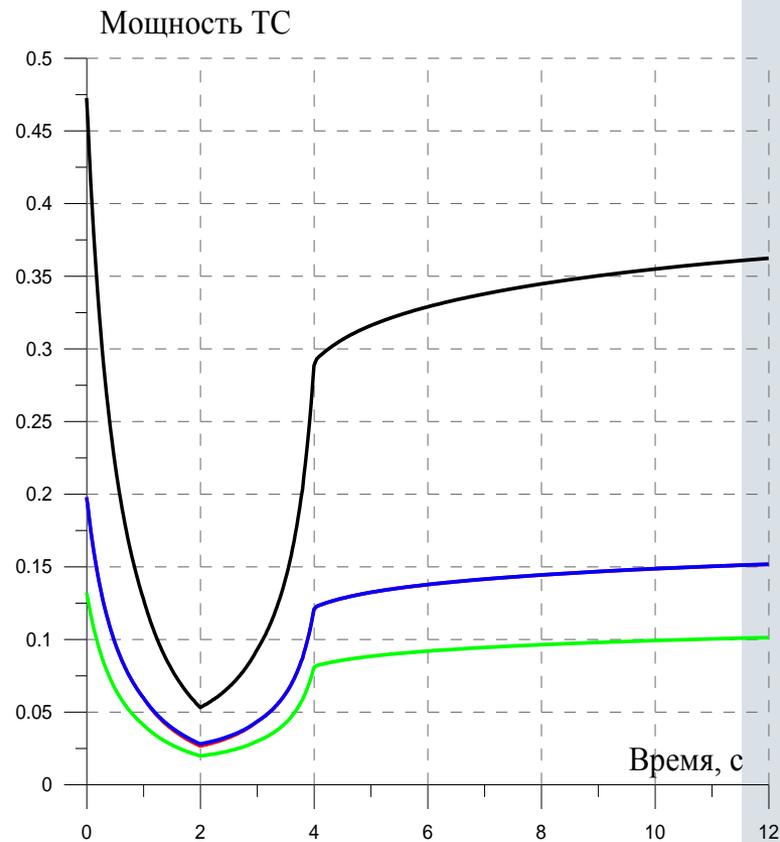
— - TD5-1; — - TD5-2; — - TD5-3; — - TD5-4



Упражнение Т5: Полная мощность в топливных сборках



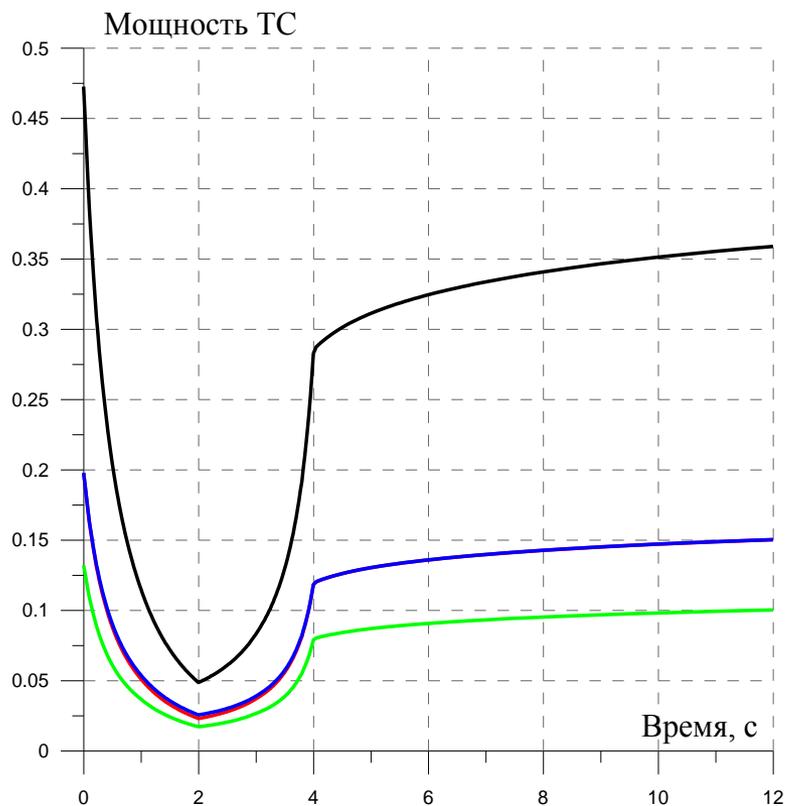
а) Тест TD5-1;



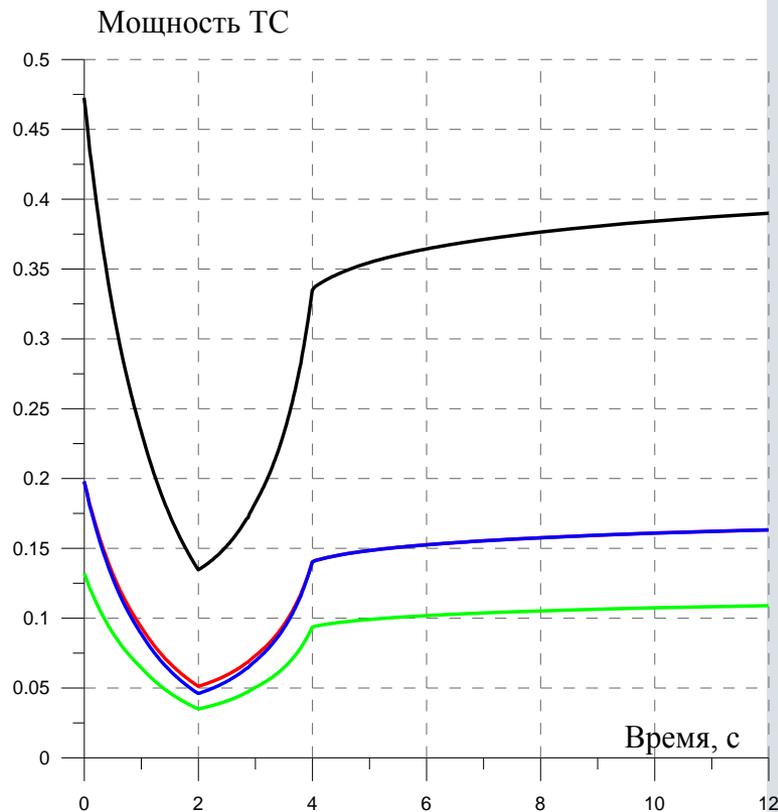
б) Тест TD5-2;

— - TC-1; — - TC-2; — - TC-3; — - TC-4

Упражнение Т5: Полная мощность в топливных сборках



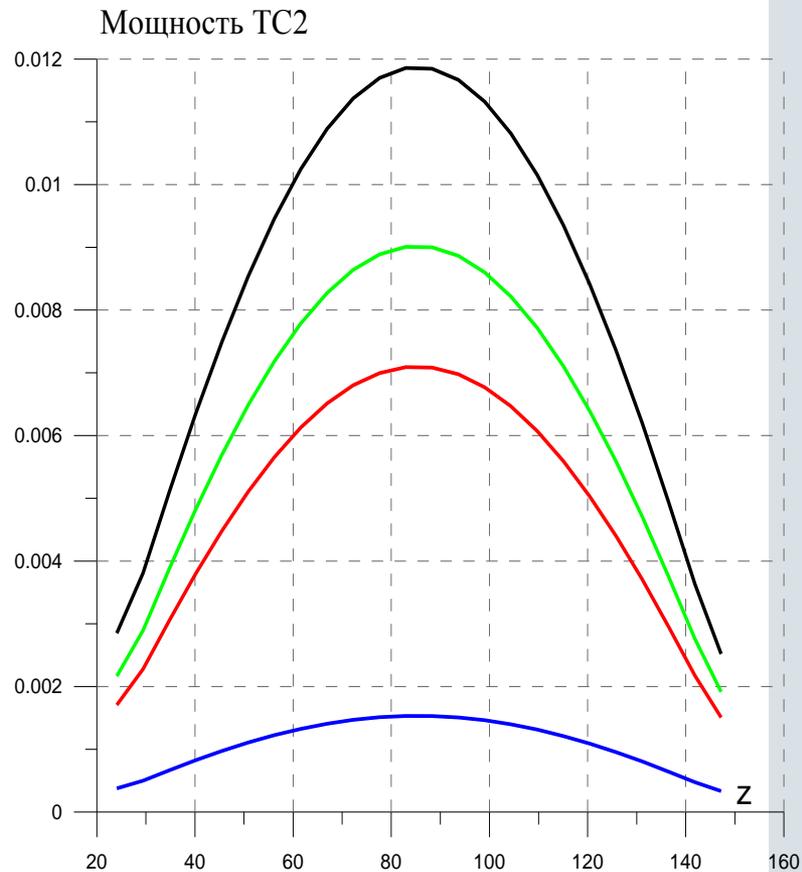
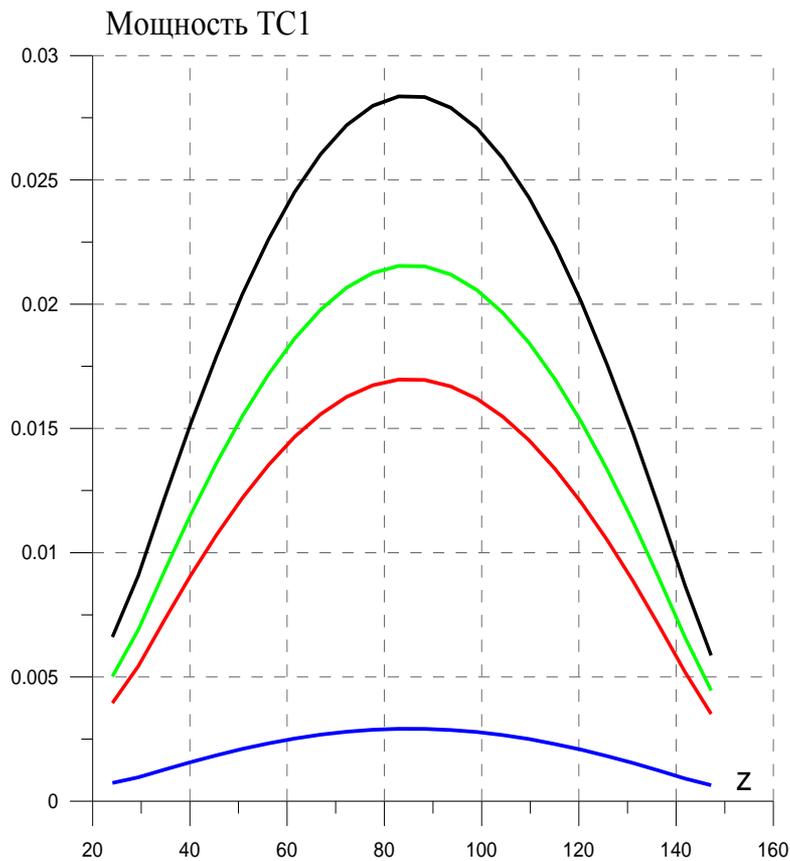
а) Тест TD5-3;



б) Тест TD5-4;

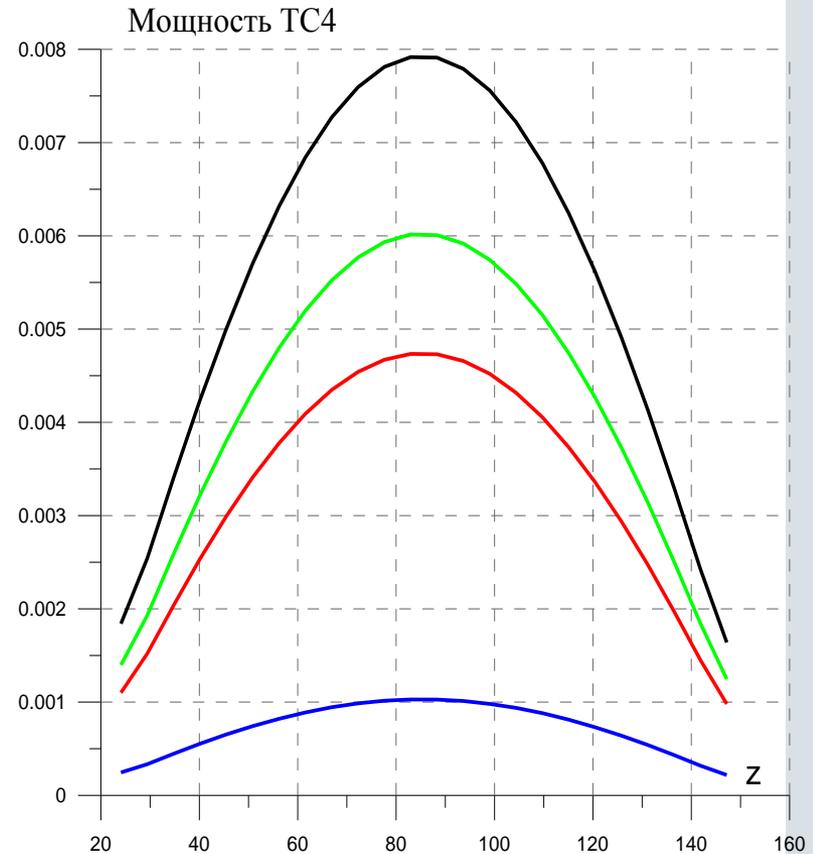
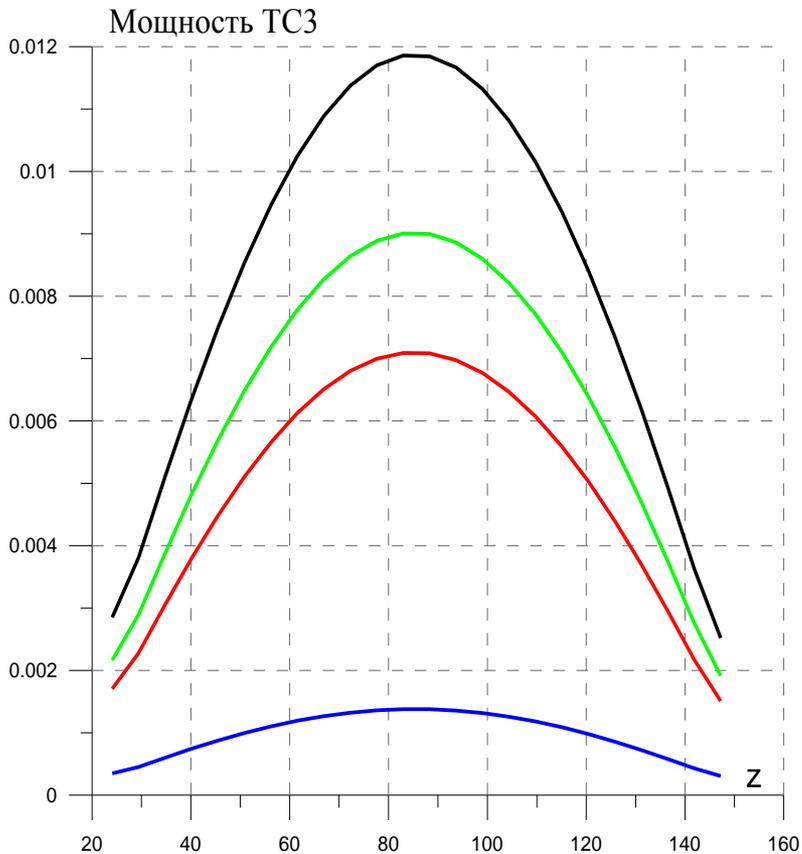
— - TC-1; — - TC-2; — - TC-3; — - TC-4

Зависимость от продольной координаты z мощности топливных сборок, тест TD5-3



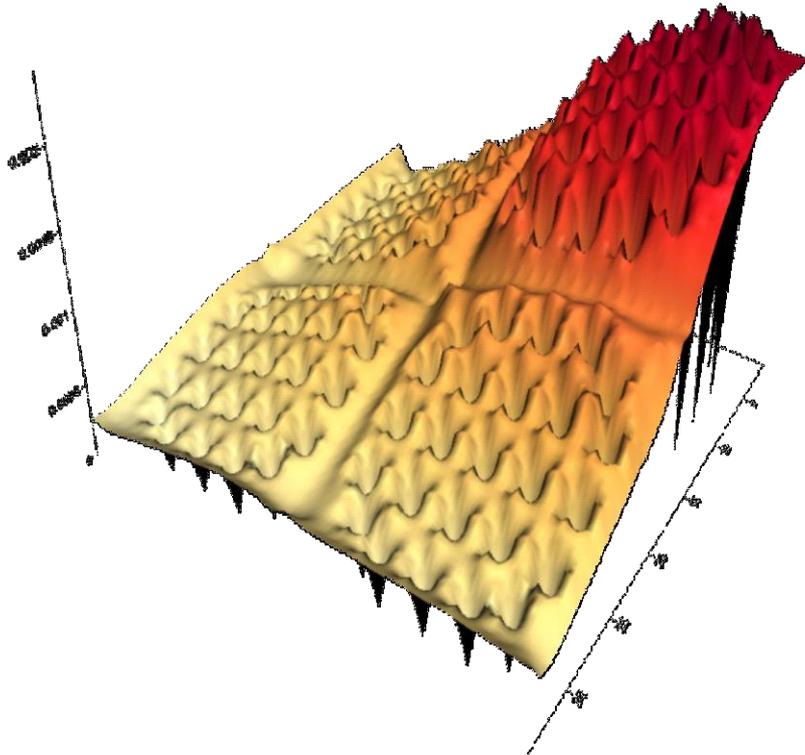
— - $t=0$ с; — - $t=2$ с; — - $t=4$ с; — - $t=12$ с

Зависимость от продольной координаты z мощности топливных сборок, тест TD5-3

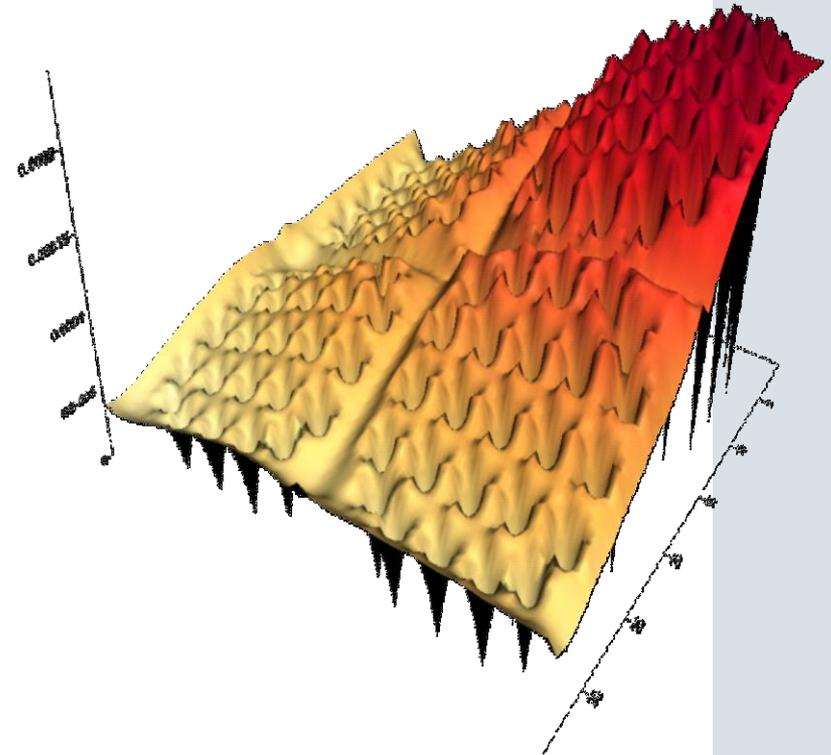


— - $t=0$ с; — - $t=2$ с; — - $t=4$ с; — - $t=12$ с

Распределения локальной по координатам x, y , интегральной по оси z мощности, TD5-3

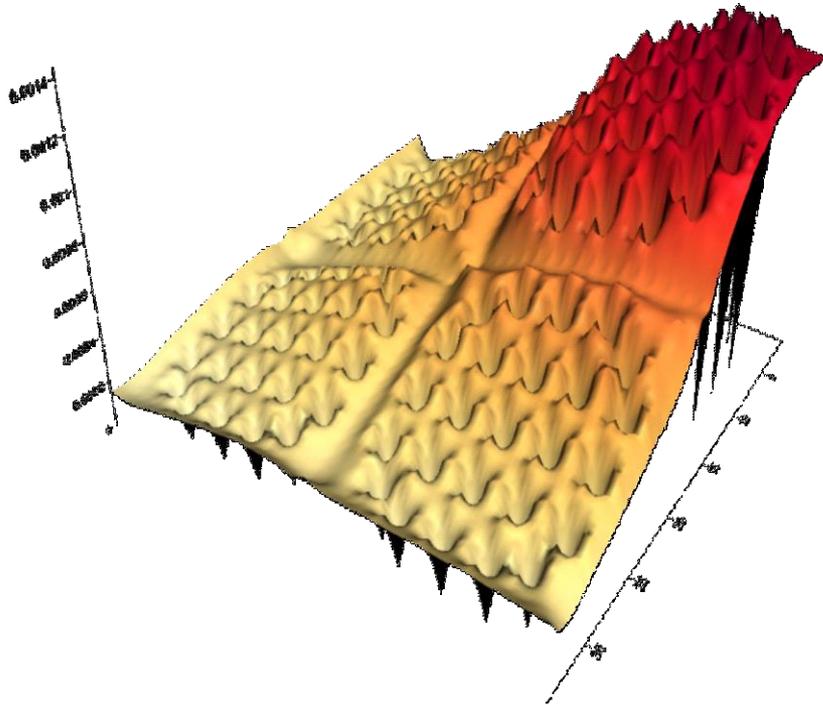


$t=0$ с

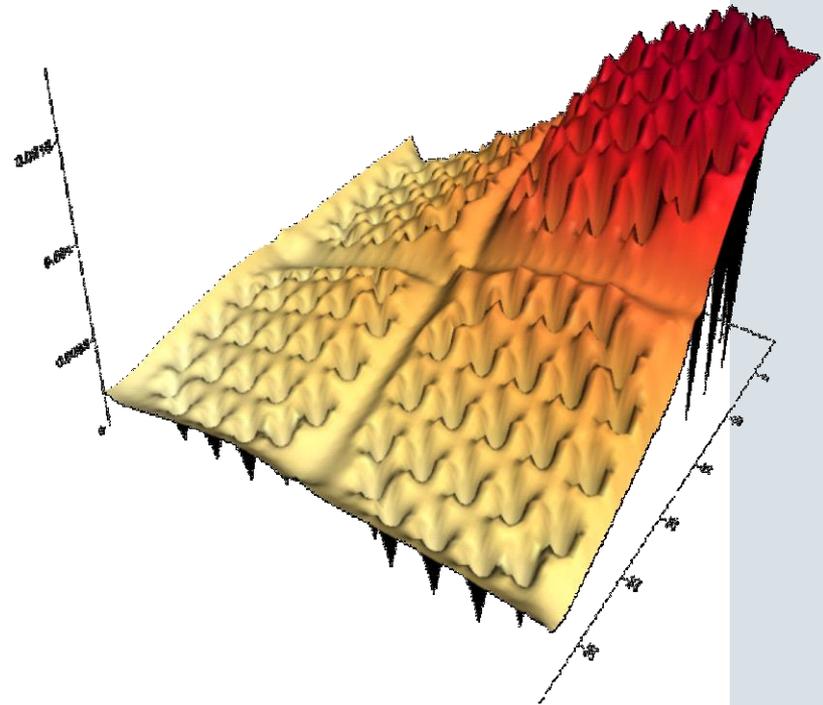


$t=2$ с

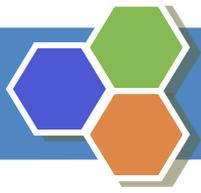
Распределения локальной по координатам x, y , интегральной по оси z мощности, TD5-3



$T=4$ c

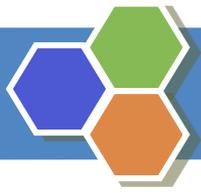


$t=12$ c



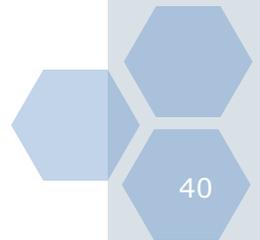
Заключение (1/2)

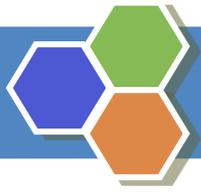
- В рамках международного нестационарного бенчмарка C5G7-TD в Курчатовском институте проводятся расчеты трехмерных тестов этого бенчмарка по программе SUHAM-3D-TD.
- В программе SUHAM-3D-TD реализованы нестационарные трехмерные конечно-разностные уравнения метода поверхностных гармоник с тремя поперечными и двумя продольными пробными матрицами для реактора с квадратной решеткой.
- В данной работе приведены результаты расчетов пяти трехмерных нестационарных тестов с движением групп управляющих стержней (тесты TD4-1, TD4-2, TD4-3, TD4-4 и TD4-5) и четырех нестационарных тестов, связанных с возмущением плотности теплоносителя в активной зоне модельного легководного реактора типа PWR, а именно тестов TD5-1, TD5-2, TD5-3, TD5-4.



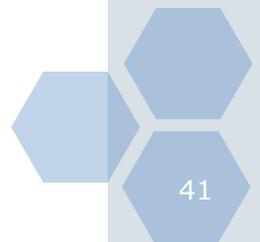
Заключение (2/2)

- ❖ Все тесты бенчмарка C5G7-TD являются “слепыми”, т.е. результаты расчетов этих тестов, пригодные для сравнения, появятся только после определенного времени, когда большая часть, участвующих в расчетах программ рассчитают эти тесты.
- ❖ В качестве результатов рассчитанных тестов приведены распределения от времени полной мощности и реактивности по Генри рассчитываемого объекта, зависимости от времени полной нормированной мощности топливных сборок, зависимости от продольной координаты z мощности топливных сборок для отдельных временных точек и распределение локальной мощности, проинтегрированной вдоль оси z по координатам x , y , для отдельных временных точек.





THANKS FOR ATTENTION





(8)

$$\rho(t) = \frac{1}{F(t)} \iiint d\mathbf{r} d\Omega dE W(\mathbf{r}, \Omega, E) \{ -\Omega \nabla \psi(\mathbf{r}, \Omega, E, t) - \Sigma(\mathbf{r}, E, t) \psi(\mathbf{r}, \Omega, E, t) + \iint d\Omega' dE' [\Sigma_s(\mathbf{r}, t, \Omega', E' \rightarrow \Omega, E) + \tilde{\chi}(E) \nu(\mathbf{r}, E') \Sigma_f(\mathbf{r}, E', t)] \psi(\mathbf{r}, \Omega', E', t) \}$$

$$F(t) = \int \dots \int d\mathbf{r} d\Omega dE d\Omega' dE' \tilde{\chi}(E) \nu(\mathbf{r}, E') \Sigma_f(\mathbf{r}, E', t) W(\mathbf{r}, \Omega, E) \psi(\mathbf{r}, \Omega', E', t)$$

