



Моделирование переходных процессов в жидкосолевых реакторах

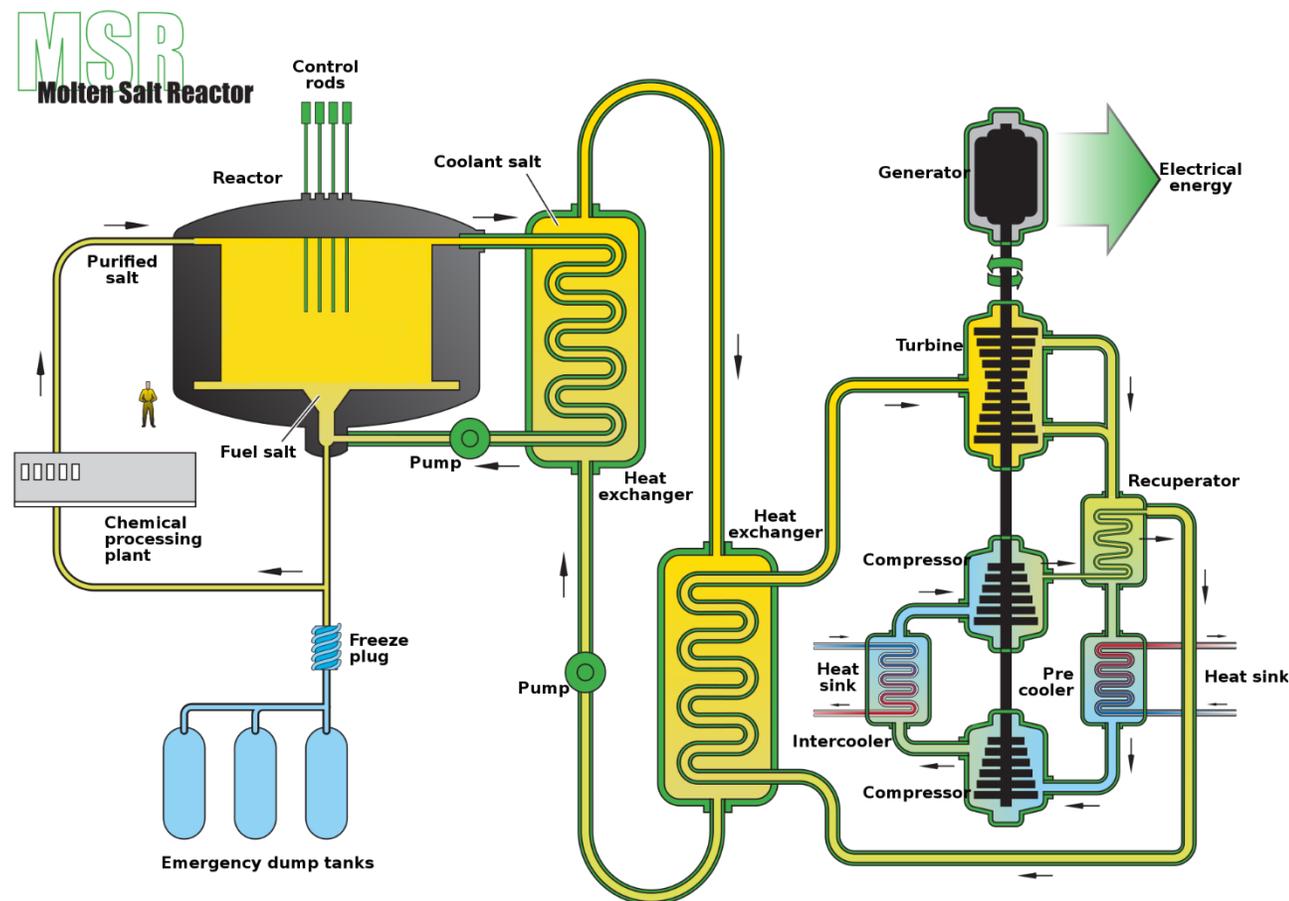
Колобовников Иван Павлович,
НИЦ “Курчатовский Институт”



Жидкосолевые реакторы

Основные особенности жидкосолевых реакторов:

1. Возможность **подпитки и вывода ПД без останова** РУ, следовательно, **оперативный запас реактивности - минимален**;
2. **Значительные** отрицательные температурные и плотностные **коэффициенты реактивности**;
3. Малое избыточное давление;
4. **Изменение** физико-химических **свойств** топливной соли в процессе выгорания топлива;
5. **Перенос ядер-предшественников** по реакторному контуру;
6. **Перенос продуктов деления** по реакторному контуру, **осаждение** нерастворимых ПД на поверхностях оборудования;
7. **Газообразные ПД и продувка** топливной соли оказывают влияние на **динамику реактора**;
8. Возможность использования системы слива топливной соли в качестве системы безопасности.

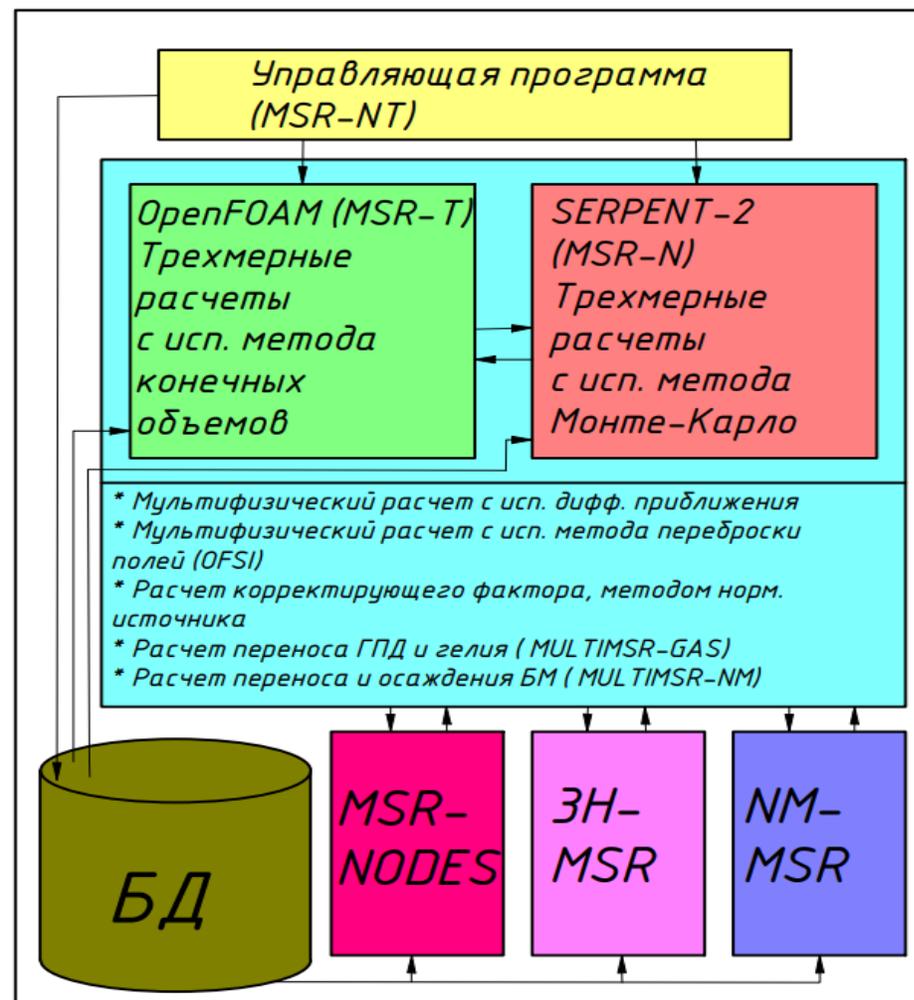




Расчётный комплекс MULTIMSR

- **ТМФР:** ПС для расчета многоконтурных систем в трехмерном приближении
- **MSR-NODES:** ПС для расчета многоконтурных систем в точечном/одномерном приближении
- **ЗН-MSR:** ПС для расчета распространения трития в контурах и помещениях жидкосолевой реакторной установки
- **NM-MSR:** ПС для расчета распределения и осаждения благородных металлов в топливном контуре ЖСР
- **БД:** База данных свойств солей-теплоносителей и конструкционных материалов

ПК MULTIMSR





Трёхмерный мультифизический решатель

- Решаемая задача описывается системой дифференциальных уравнений, которые решаются методом конечных объёмов, используя библиотеку OpenFOAM;
- Используются приближения несжимаемой жидкости (Буссинеска) и пористого тела;

Уравнение сохранения **энергии** для **жидкости**:

$$\frac{\partial \zeta T}{\partial t} + \nabla(\zeta UT) - \Delta \zeta a T = \zeta \frac{q_v}{\gamma C_p} + \zeta \frac{A_v h(T-T^*)}{\gamma C_p}$$

И **твёрдого тела**:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(a \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) + \frac{q_v}{\gamma C_p},$$

Нейтронная физика моделируется в **диффузионном** приближении:

$$\nabla D_j \nabla \Phi_j - \Sigma_{a_j} \Phi_j - \sum_{j' \neq j}^m \Sigma_{s,j \rightarrow j'} \Phi_j + \sum_{j' \neq j}^m \Sigma_{s,j' \rightarrow j} \Phi_{j'} + (1 - \beta_0) \chi_{\text{мгн.},j} \sum_{j'}^m \frac{1}{K_{\text{эфф ном}}} (v_f \Sigma_f)_{j'} \Phi_{j'} + \sum_i^n \chi_{\text{зап.},j} \lambda_i C_i = \frac{1}{v_j} \frac{\partial \Phi_j}{\partial t}, j=1..m$$

$$-\nabla(u C_i) + \nabla \frac{v_T + v}{Sc_T} \nabla C_i - \lambda_i C_i + \beta_{0,i} \sum_j^m \frac{1}{K_{\text{эфф ном}}} (v_f \Sigma_f)_j \Phi_j = \frac{\partial C_i}{\partial t}, i = 1..n$$

Учёт **зависимости макросечений** от плотности и температуры:

$$\Sigma = [\Sigma_{\text{реф}} + \alpha_{\text{реф}} \ln \left(\frac{T}{T_{\text{реф}}} \right)] \frac{\zeta \gamma}{\gamma_{\text{реф}}},$$

Система уравнений для моделирования **гидродинамики**:

$$\frac{\partial \zeta \gamma}{\partial t} + \frac{\partial \zeta \gamma u_j}{\partial x_j} = 0,$$

$$\frac{\gamma \partial \zeta u_i}{\partial t} + \gamma u_j \frac{\partial \zeta u_i}{\partial x_j} = -\zeta \frac{\partial p}{\partial x_i} + \zeta \gamma g + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \frac{\partial \zeta u_i}{\partial x_j} - \gamma u'_i u'_j \right] + \zeta F_{\text{тр},i},$$

$$-\gamma u'_i u'_j = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \gamma k \delta_{ij},$$



MSR-NODES

- Одномерное представление контурной схемы РУ. Реальные каналы сводятся к эквивалентным;
- Три вида УТК: для твердотопливного реактора, расширенное (Р-УТК), с корректирующим фактором (К-УТК);

Нейтронная физика моделируется в приближении точечной кинетики:

$$\frac{dN}{dt} = \frac{\rho - \beta_{\text{эф}} \Sigma}{l^*} N + \sum_{j=1}^n \lambda_j C_j + Q,$$

$$\frac{dC_j}{dt} = \frac{\beta_{\text{эф}j \text{ стат}}}{l^*} N - \lambda_j C_j - \lambda_c C_j + \lambda_e C_{e_j},$$

$$\frac{dC_{e_j}}{dt} = -\lambda_j C_{e_j} + \lambda_c C_j - \lambda_e C_{e_j},$$

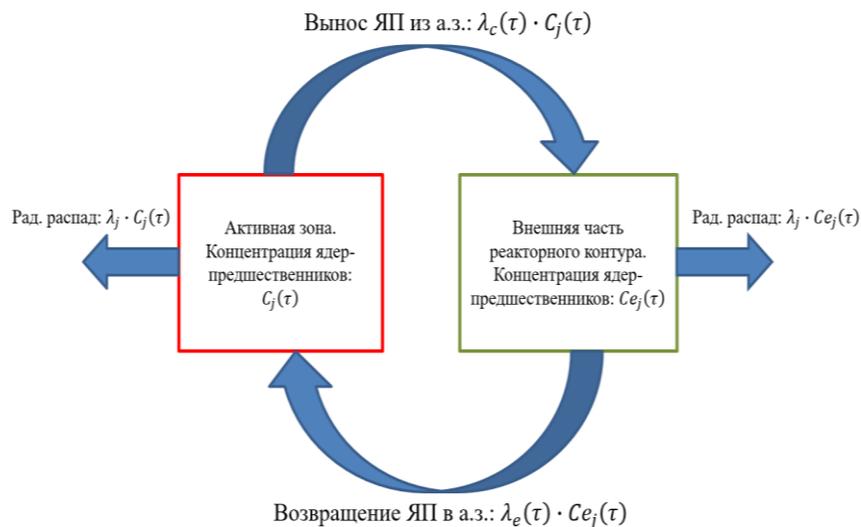
Корректирующий фактор:

$$C_{fj} = \frac{\beta_{\text{эф}j \text{ движ}}}{\beta_{\text{эф}j \text{ стат}}},$$

Уравнение сохранения энергии для жидкости и стенки канала:

$$m_{fi} C_{p_{fi}} \frac{dT_{fi}}{dt} = G C_{p_{fi}} (T_{fi-1} - T_{fi}) + \alpha_{fwi} A_{fwi} (T_{wi} - T_{fi}) + k_{fi} P_{fi},$$

$$m_{wi} C_{p_{wi}} \frac{dT_{wi}}{dt} = \alpha_{fwi} A_{fwi} (T_{fi} - T_{wi}) + k_{wi} P_{wi},$$





Расчётная модель

Топливная соль – $73\text{LiF}-27\text{BeF}_2-(\text{PuF}_3+\text{A}_n\text{F}_m)$

Промежуточный теплоноситель – $66\text{LiF}-34\text{BeF}_2$

Таблица 1. Основные параметры РУ ЖСР

| Параметр | Значение |
|---|----------|
| Диаметр активной зоны, м | 1,22 |
| Высота активной зоны, м | 1,65 |
| Диаметр внешнего трубопровода, м | 0,15 |
| Тепловая мощность, МВт | 10 |
| Массовый расход в реакторном контуре, кг/с | 141,6 |
| Температура топливной соли на входе в а.з., К | 937 |
| Температура топливной соли на выходе из а.з., К | 973 |
| Массовый расход в промежуточном контуре, кг/с | 285 |
| Температура промежуточного т.н. на входе в ПТО, К | 853 |
| Температура промежуточного т.н. на выходе из ПТО, К | 868 |

Иницирующее событие – мгновенный останов насоса промежуточного контура без учета выбега.

В переходном процессе температура промежуточного теплоносителя на входе в ПТО принята неизменной — 853К.

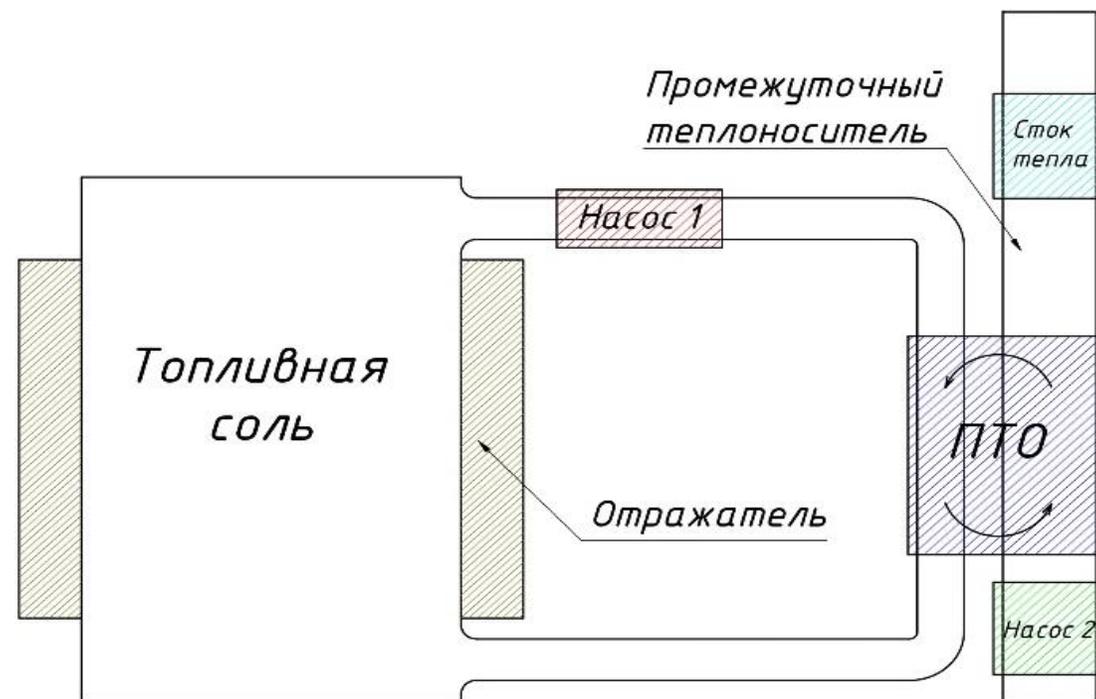
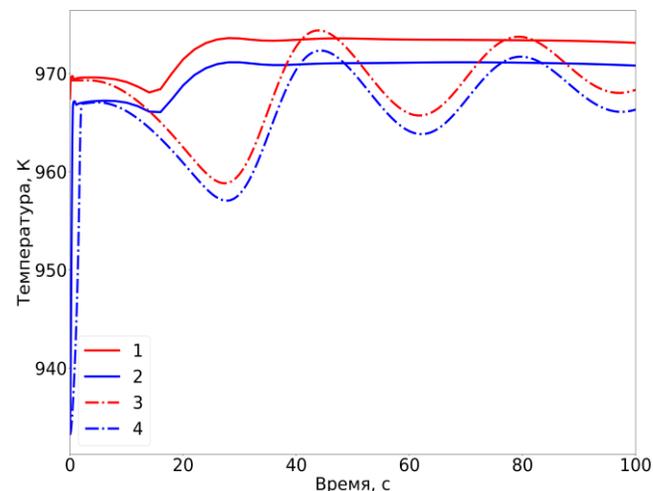


Рисунок 2 – Расчётная модель РУ ЖСР

Результаты расчёта (1)

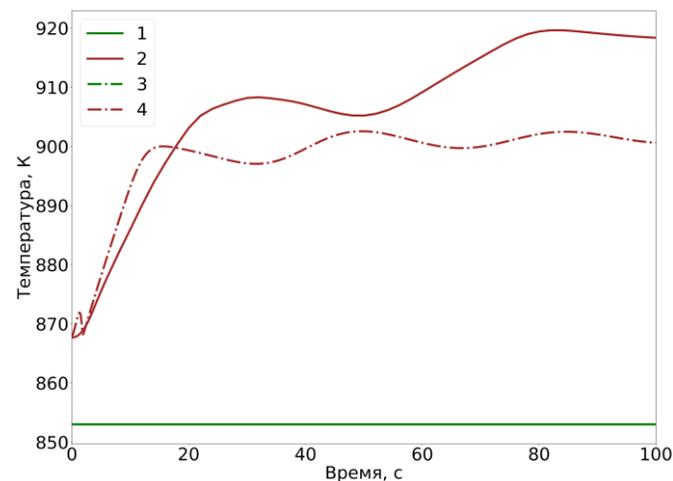
В ТМФР установившийся уровень естественной циркуляции определялся решением системы уравнений гидродинамики, тогда как в ПС MSR-NODES динамика изменения расхода задавалась как функция времени, полученная из результатов ТМФР.

При потере принудительной циркуляции в промежуточном контуре в нем устанавливается **режим естественной циркуляции** с расходом теплоносителя, равным **1,7% от номинального**. Такое уменьшение расхода, и следовательно, скорости теплоносителя в ПТО вызывает ухудшение теплообмена со стороны промежуточного контура, что приводит к росту как температур топливной соли, так и промежуточного теплоносителя на выходе из ПТО.



- 1 – ТМФР вход
- 2 – ТМФР выход
- 3 – MSR-NODES вход
- 4 – MSR-NODES выход

Рисунок 3 – Изменение температур топливной соли в ПТО



- 1 – ТМФР вход
- 2 – ТМФР выход
- 3 – MSR-NODES вход
- 4 – MSR-NODES выход

Рисунок 4 – Изменение температур пром. теплоносителя в ПТО

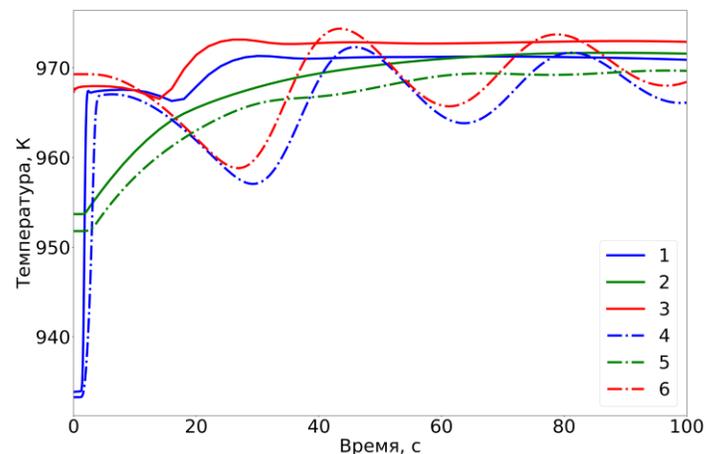


Результаты расчёта (2)

Перегретая топливная соль поступает в а.з. спустя приблизительно 2 секунды, после чего начинается смешивание с холодной солью находящейся в ней. Это приводит к плавному росту средней температуры и, как следствие, падению мощности за счет обратных связей.

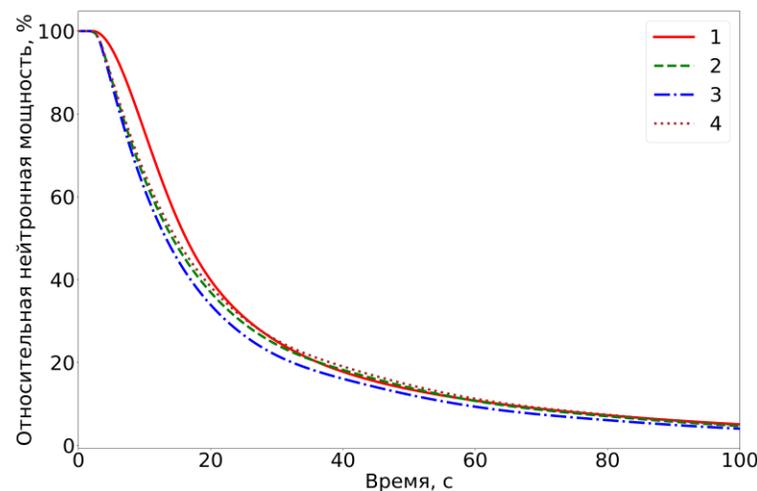
При использовании **К-УТК** результаты расчёта демонстрируют **наибольшее расхождение** с ТМФР, что обусловлено в первую очередь различием начальных реактивностей: **11,4% $\beta_{эф \Sigma}$ против 4,4% $\beta_{эф \Sigma}$ по Р-УТК.**

В случае использования УТК отклонение мощности от ТМФР сопоставимо с Р-УТК, что объясняется малым объёмом внешней части реакторного контура (7% от полного объёма) и слабым изменением скорости топливной соли в рассматриваемом переходном процессе.



- 1 – ТМФР вход
- 2 – ТМФР осреднённая
- 3 – ТМФР выход
- 4 – MSR-NODES вход
- 5 – MSR-NODES осреднённая
- 6 – MSR-NODES выход

Рисунок 5 – Изменение температур топливной соли в реакторе



- 1 – ТМФР
- 2 – MSR-NODES Р-УТК
- 3 – MSR-NODES К-УТК
- 4 – MSR-NODES УТК

Рисунок 6 – Изменение относительной нейтронной мощности



Результаты расчёта (3)

В соответствии с приведёнными результатами расчёта, максимальные температуры топливной соли, вычисленные по ТМФР и ПС MSR-NODES, хорошо согласуются. Расхождение в температуре промежуточного теплоносителя преимущественно обусловлено различием в итоговом расходе естественной циркуляции, который варьируется в ТМФР и постоянен при одномерном моделировании.

Таблица 2. Максимальные температуры топливной соли и теплоносителя промежуточного контура в переходном процессе

| Участок контура | ТМФР | MSR-NODES |
|-----------------------------|------|-----------|
| Топливная соль | | |
| На входе а.з., К | 971 | 972 |
| На выходе а.з., К | 973 | 974 |
| Средняя по а.з., К | 971 | 969 |
| Промежуточный теплоноситель | | |
| На выходе из ПТО, К | 920 | 903 |



Выводы

- Рассматриваемый переходной процесс имеет колебательный характер как при трехмерном, так и при одномерном моделировании РУ. В одномерном приближении колебательный характер процесса более выражен, при трехмерном моделировании угасание температурного возмущения и стабилизация параметров РУ наступают быстрее;
- Использование одномерного моделирования может быть применимо для оценки изменения интегральных параметров ЖСР, таких как нейтронная мощность и средняя температура а.з. При этом для каждого конкретного инициирующего события следует проводить кросс-верификацию с трехмерным расчетом, чтобы удостовериться в корректности применяемых упрощений;
- Результаты расчёта подтверждают высокую степень инерционности рассмотренного переходного процесса в РУ ЖСР тепловой мощностью 10 МВт с а.з. полостного типа. За первые 100 с. от начала переходного процесса относительная нейтронная мощность реактора уменьшается до 10%, увеличение температуры топливной соли не превышает 10 К, промежуточного теплоносителя — 60 К;



Спасибо за внимание!

**Колобовников Иван Павлович, НИЦ “Курчатовский Институт”,
E-mail: kip1998@inbox.ru / Kolobovnikov_IP@nrcki.ru**