



РОСАТОМ



РФЯЦ-ВНИИТФ

Оптимизация нейтронно-физических и теплогидравлических характеристик активной зоны блочного расплавно-солевого реактора с разделением функций производства и передачи энергии

Международная конференция «**XIII ЗАБАБАХИНСКИЕ НАУЧНЫЕ ЧТЕНИЯ**»,
20–24 марта 2017 г., Снежинск

М.Н. Белоногов, В.А. Симоненко

ВВЕДЕНИЕ

В подавляющем большинстве зарубежных и российских проектов расплавносолевых реакторов рассматривается реактор полостного типа с быстрым спектром нейтронов с циркулирующей топливной солью (например, проекты MOSART [1], MSFR [2]).

Реактор с прокачиваемой топливной солью обладает рядом существенных недостатков:

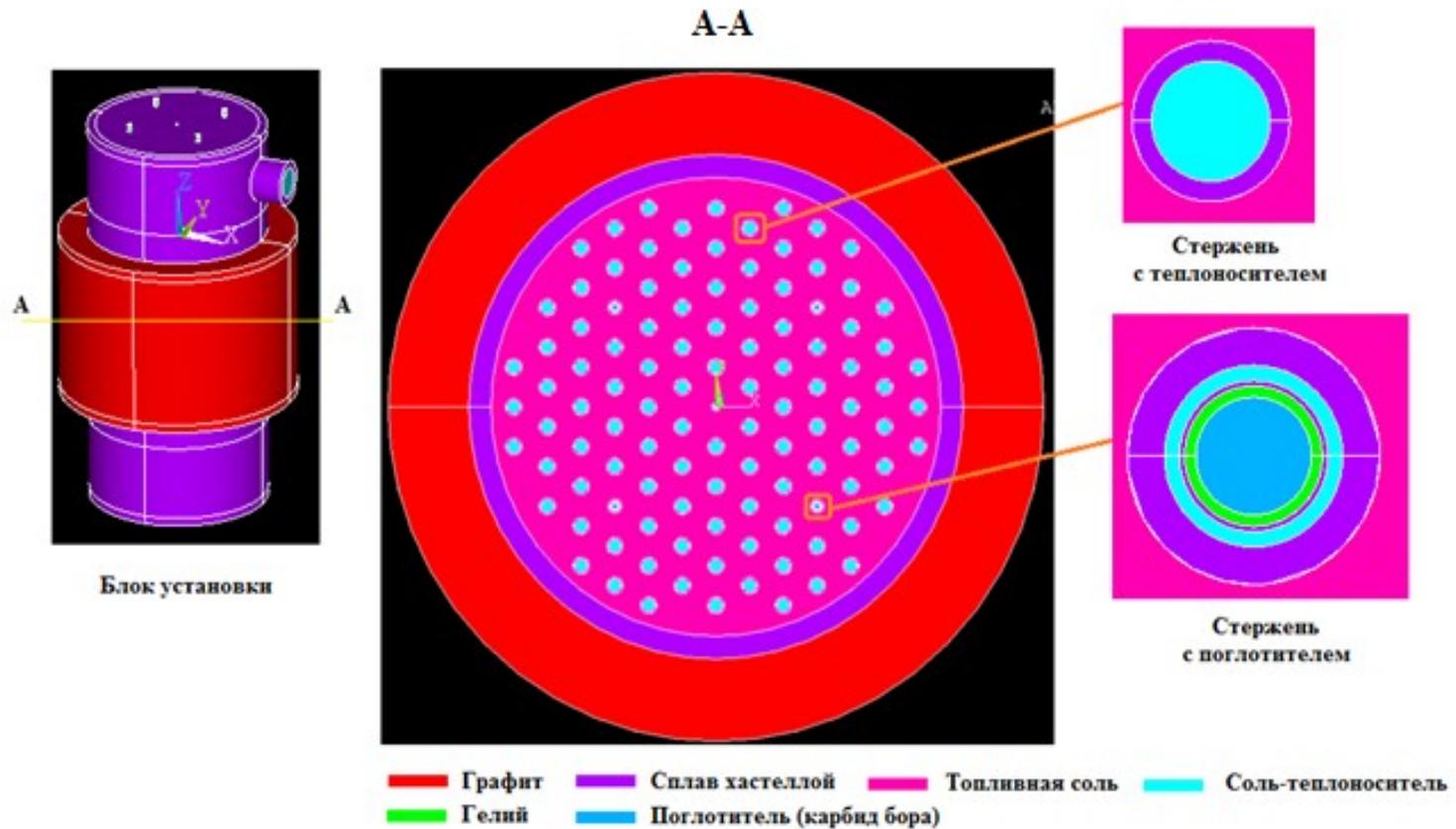
- ✓ эффективная доля запаздывающих нейтронов примерно в два раза меньше, чем для реакторов с покоящимся топливом, что обусловлено, прежде всего, распадом части ядер-предшественников вне активной зоны;
- ✓ требование высокой износостойкости конструкционных материалов активной зоны и первого контура в условиях прокачки топливной соли в течение приемлемого срока эксплуатации установки (50-60 лет);
- ✓ остается нерешенным вопрос организации системы управления и защиты.

В работе рассматривается альтернативная концепция блочного расплавносолевого реактора с неподвижным топливом.

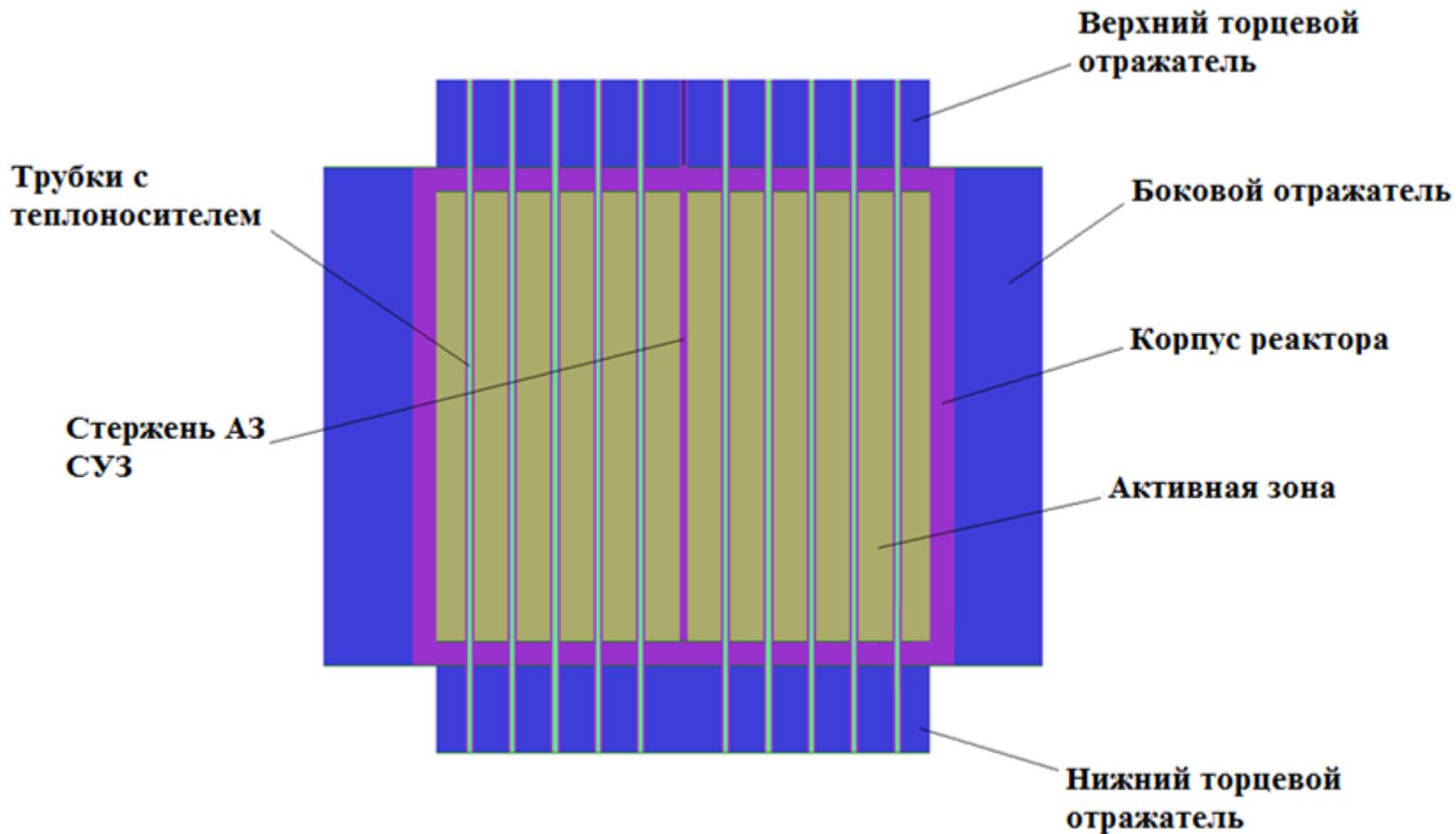
[1] – Ignatiev, V., Feynberg, O. Progress in Development of Li, Be, Na/F Molten Salt Actinide Recycler and Transmuter Concept [Electronic resource]: www.torium.se/res/Documents/7548.pdf. International Congress on Advanced in Nuclear Power Plants, Societe Francaise d'Energie Nucleaire. – 2007.

[2] – Fast Spectrum Molten Salt Reactor Options [Text]. – Oak Ridge National Laboratory, ORNL/TM-2011/105 , Auth.: Holcomb, D.E., Flanagan, G.F., Patton, B.W., Gehin, J.C., Howard, R.L., Harrison, T.J., 2011.

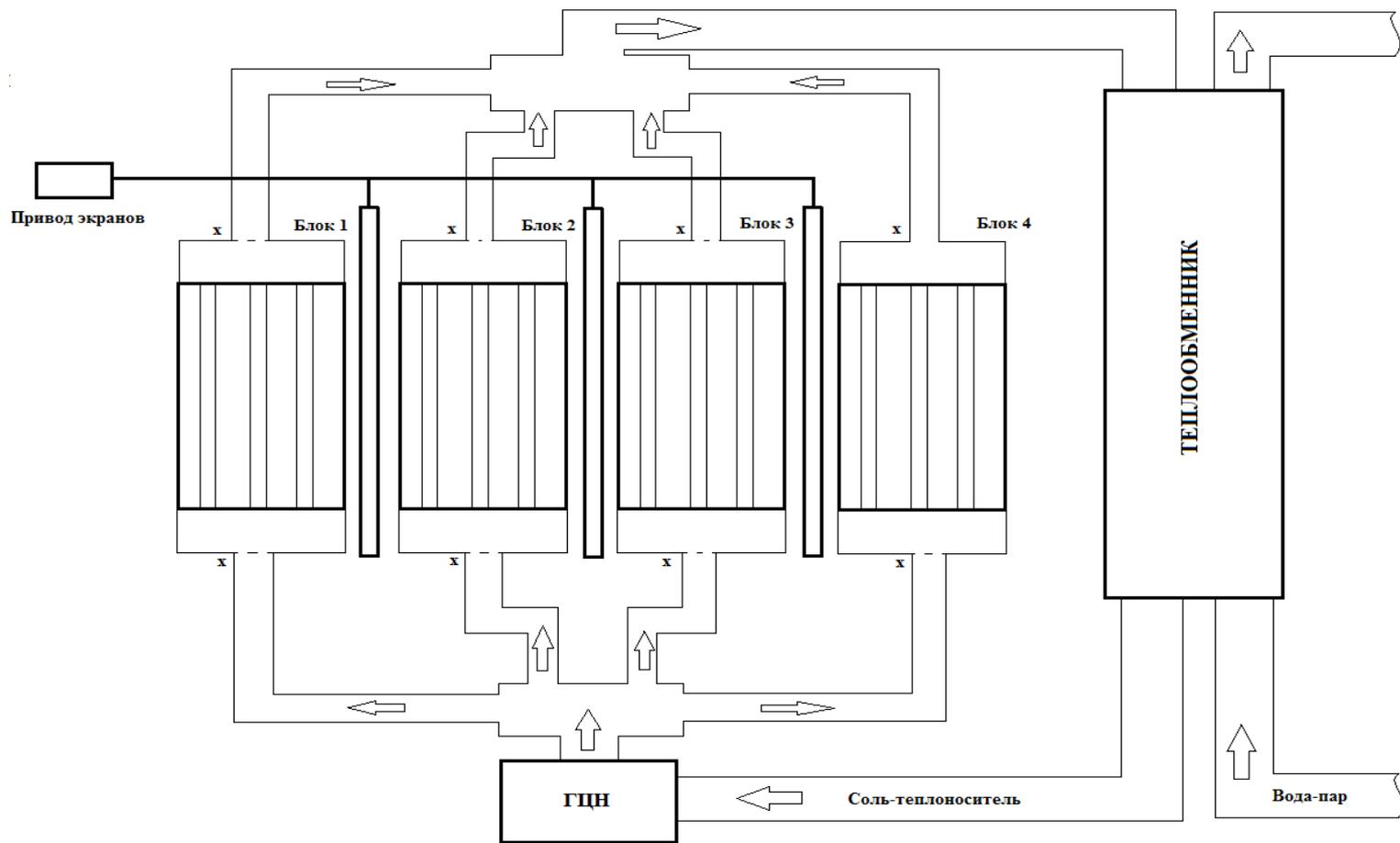
Блок реактора и его разрез на уровне активной зоны



Блок реактора. Вид сбоку



Концепция блочного расплавносолевого реактора



Связанный расчет нейтронно-физических и теплогидравлических характеристик. Постановка задачи

Параметр	Значение
Высота активной зоны	102,901 (см)
Радиус активной зоны	55,618 (см)
Толщина верхнего и нижнего отражателей	20 (см)
Толщина верхнего и нижнего коллекторов	50 (см)
Толщина корпуса реактора	5,5 (см)
Толщина стенки канала с теплоносителем и СУЗ	0,5 (см)
Радиус канала с теплоносителем	2 (см)
Радиус канала с стержнями СУЗ	1,7 (см)
Зазор между оболочкой несущей трубы и стержнем ПЭЛ	0,2 (см)
Скорость на входе в коллектор	0,76 м/с
Температура на входе в коллектор	600 С
Толщина газового зазора между оболочкой канала и материалом ПЭЛ	0,15 (см)

Каналы с теплоносителем и стержнями СУЗ расположены в соответствии с гексагональной решеткой (правильные шестигранники) с шагом 5,5618 (см).

Выбранные материалы блока реактора

- Топливная соль – эвтектика FLiNaK (11,5NaF - 46,5LiF - 42KF, % моль) с растворенным в ней UF_4 , обогащение по Li^7 – до 99,99%;
- Соль-теплоноситель – FLiNaK;
- Корпус реактора – сплав хастеллой-Н на основе никеля и молибдена;
- Трубки – на данный момент рассматриваются сплав хастеллой-Н и керамические материалы;
- Отражатель – графит;
- Поглотитель – карбид бора;
- Газовый зазор в стержне с поглотителем – гелий.

Динамическая модель блока реактора

Динамическая модель блока реактора позволяет:

- ✓ автоматически перестраивать геометрию реактора и изменять начальные и граничные условия с помощью управляющих параметров;
- ✓ варьировать детализацию расчетной сетки (в случае использования программы конечно-элементного анализа);
- ✓ реализовать алгоритм движения органов системы управления и защиты;
- ✓ значительно сократить время подготовки задания на расчет;
- ✓ автоматизировать процесс проведения расчетов.

Динамическая модель блока реактора. Используемые программные средства

Для проведения детального теплогидравлического расчета полномасштабной модели блока реакторной установки необходимо построение сеточной модели с *большим количеством ячеек* (примерно 5 миллионов). Предварительные теплогидравлические расчеты с таким количеством элементов с использованием программного пакета ANSYS FLOTTRAN показали значительное время расчета ввиду отсутствия возможности проведения параллельных вычислений. Поэтому было принято решение использовать *параллельную версию* программного пакета ANSYS FLUENT [1]. Это позволило на порядок сократить время одного расчета. Для построения сеточной модели использовались средства сеткопостроителя Meshing среды моделирования ANSYS Workbench.

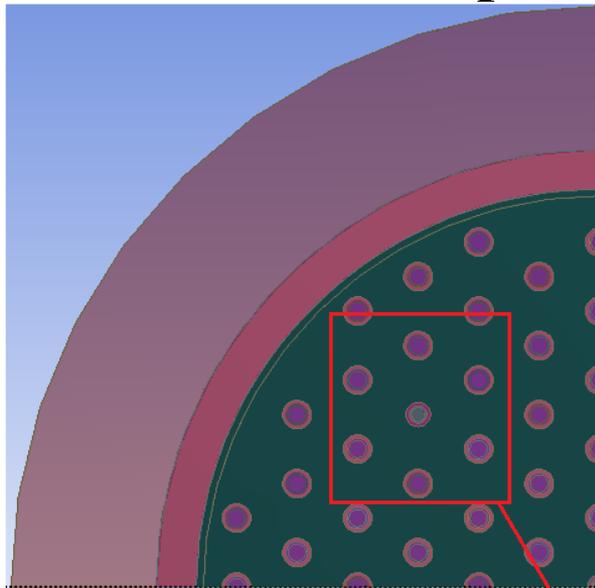
Расчеты нейтронно-физических характеристик и эволюции изотопного состава были проведены с помощью программного комплекса ПРИЗМА+РИСК, разработанного в РФЯЦ-ВНИИТФ [2, 3].

[1] – Инженерный анализ в Ansys Workbench / Бруйка В.А., Фокин В.Г., Солдусова Е.А., Глазунова Н.А., Адеянов И.Е. Самара: Самарский государственный технический университет, 2010. – 271 с.

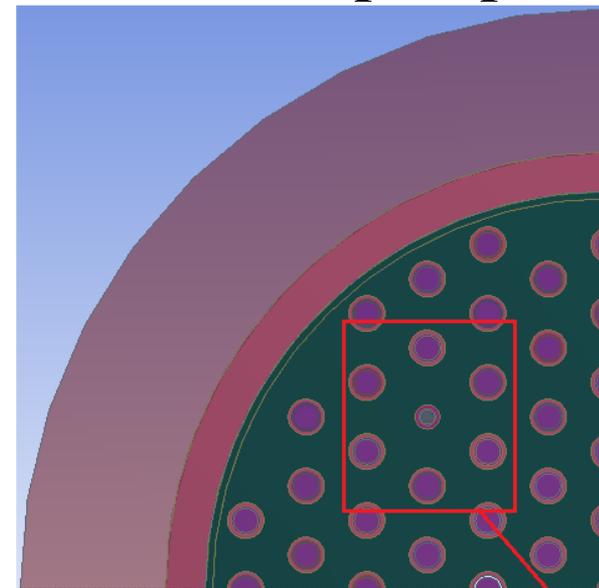
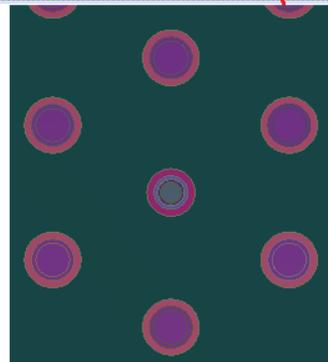
[2] – Кандиев Я.З. Оценка эффектов малых возмущений в многовариантных расчётах по программе ПРИЗМА-Д / Кандиев Я.З., Малахов А.А. [и др.] // Атомная энергия. – 2005. – Т. 99. – В. 3, С. 203 – 210.

[3] – Модестов Д. Г. Программа решения задач ядерной кинетики РИСК- 2014. Препринт РФЯЦ-ВНИИТФ №243, Снежинск, 2014.

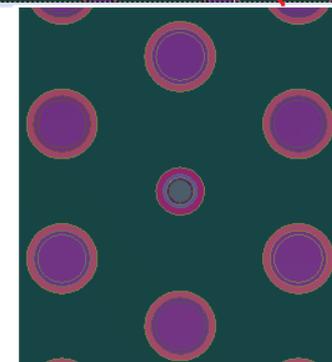
Возможности реализованной динамической модели. Автоматическая перестройка геометрии реактора



Радиус стержня с
теплоносителем -
0.015 м

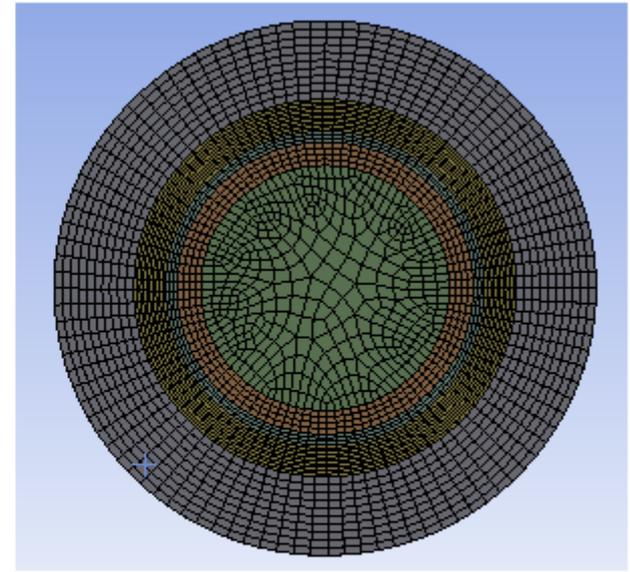
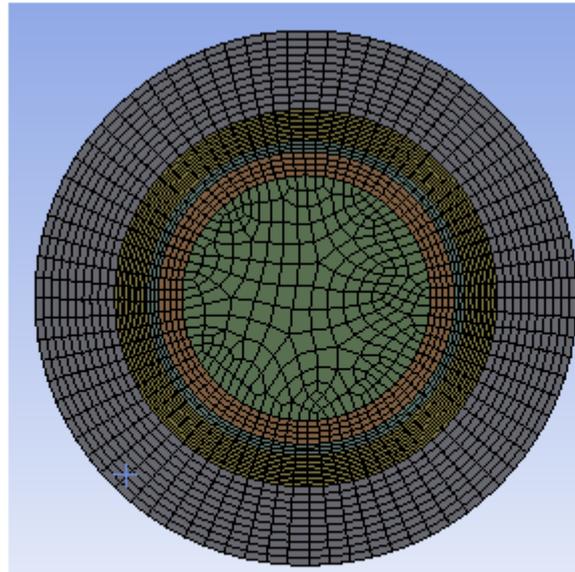
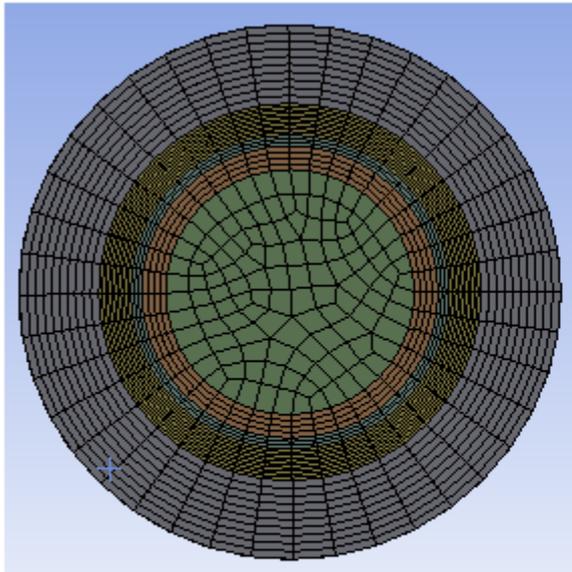


Радиус стержня с
теплоносителем -
0.02



В модель заложена возможность автоматического изменения основных геометрических размеров блока реактора.

Возможности реализованной динамической модели. Автоматическая генерация расчетной сетки



**Количество разбиений по
окружности - 40**

**Количество разбиений по
окружности - 80**

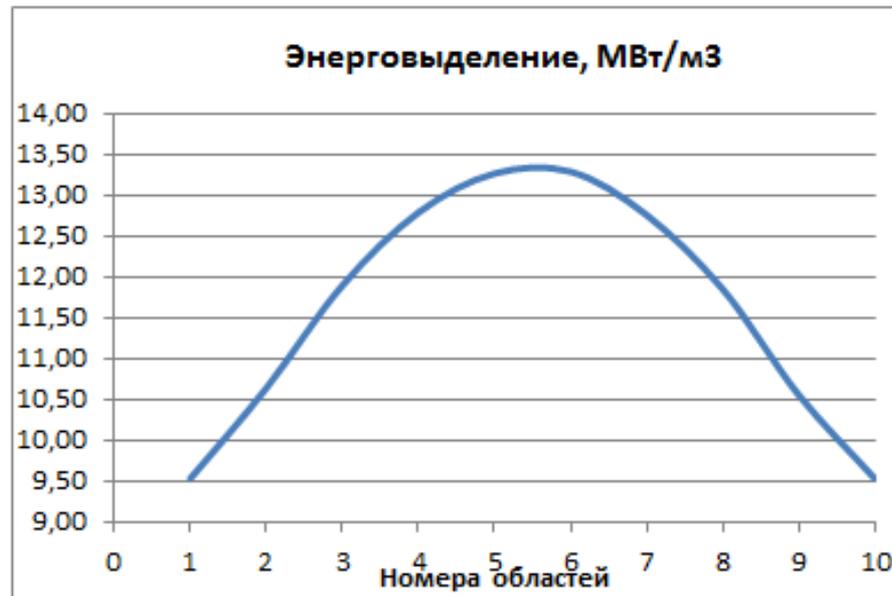
**Количество разбиений по
окружности - 100**

Для ускорения процесса построения сеточной модели используются управляющие параметры.

Нейтронно-физические характеристики блока реактора.

Часть 1

- состав топливной соли, обеспечивающий критичность блока в течение времени его эксплуатации (10 лет) с учетом запаса реактивности на выгорание: $78\text{FLiNaK} + 22\text{UF}_4$ (% моль). Обогащение по U-235 – 67%;
- при выбранной мощности блока 10 МВт, объеме активной зоны 1 м^3 , толщине отражателя 0,2 м и времени работы 10 лет запас реактивности на выгорание составил $0,032056 K_{\text{эфф}}$.

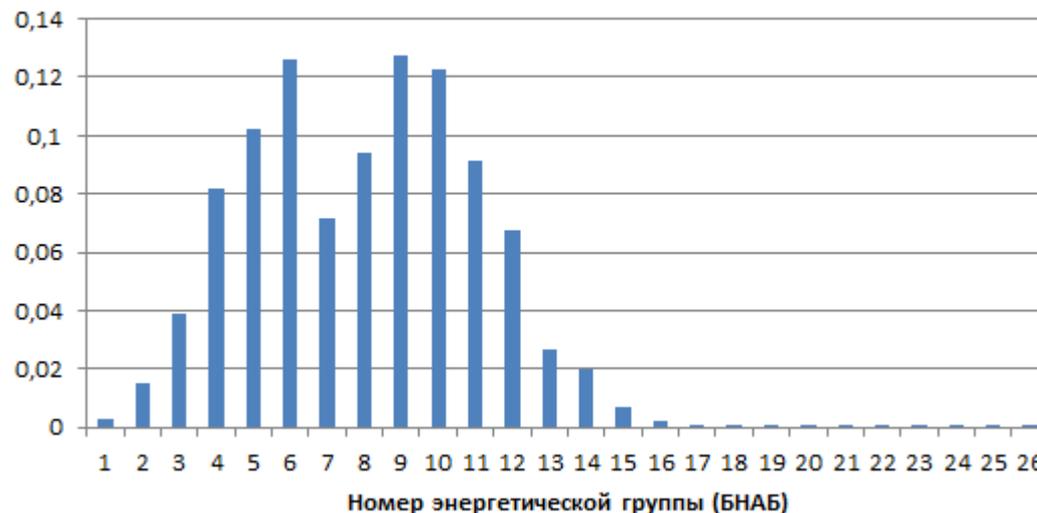


Нейтронно-физические характеристики блока реактора.

Часть 2

- для управления реактором толщина поглотителя в стержнях СУЗ должна быть не менее 1,2 см;
- средняя энергия нейтронов в реакторе ~ 105 КэВ
- эффективная доля запаздывающих нейтронов 0,00751.
- для проведения связанного теплогидравлического расчета активная зона была разбита на 10 частей по высоте и произведен расчет энерговыделения;

Спектр нейтронов АЗ, нормировка на 1



Особенности проведения теплогидравлических расчетов блока реактора

1. Сложность описания процессов переноса тепла за счет естественной конвекции в объеме топливной соли, обусловленная, прежде всего
 - значительной турбулизацией потоков жидкости (большие значения числа Рэлея),
 - большими градиентами температур между охлаждающей поверхностью (каналы с теплоносителем) и топливной солью (порядка 700 С);
2. Необходимость проведения многовариантных расчетов с целью выбора расчетной сетки, обеспечивающей заданную точность (в основном, сеточное описание пограничных слоев);
3. Выбор модели расчета турбулентности.

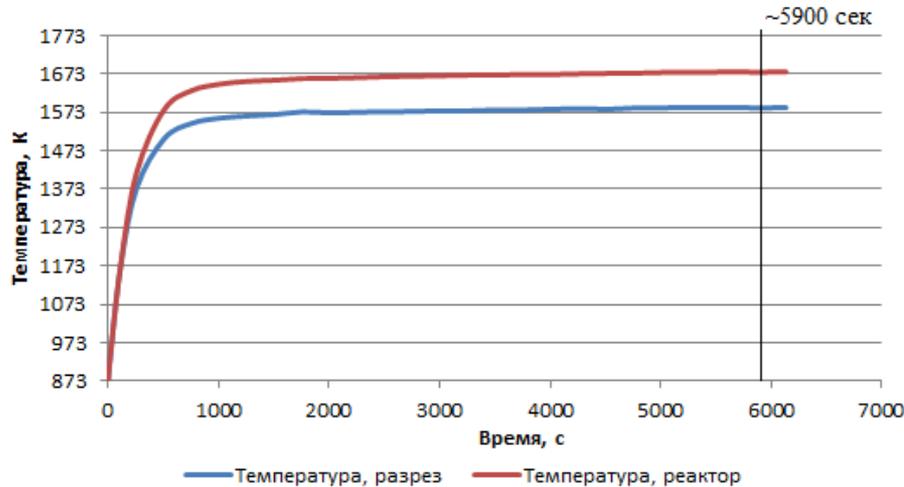
Результаты предварительных теплогидравлических расчетов

Стационарный расчет процессов переноса тепла за счет естественной конвекции с использованием пакета ANSYS FLUENT не дал положительных результатов, что, по-видимому, связано со сложностью моделирования естественно-конвективных процессов переноса энергии. Добиться сходимости удалось в **нестационарном расчете с шагом по времени 0,5 сек первые 5000 сек расчета, в дальнейшем шаг был уменьшен до 0,25 сек.**

Проведенный анализ сеточной сходимости позволил определить количество элементов (**~2 млн. ячеек**), обеспечивающих приемлемую точность расчета.

Выбор модели турбулентности является достаточно сложной задачей и требует дополнительного анализа, однако, многие исследователи конвективных процессов, базируясь на экспериментальных данных и результатах моделирования, утверждают, что наиболее точно естественную конвекцию описывает **модель $k-\omega$ SST**.

Результаты нестационарного теплогидравлического расчета. Выход реактора на стационарный режим работы по температуре

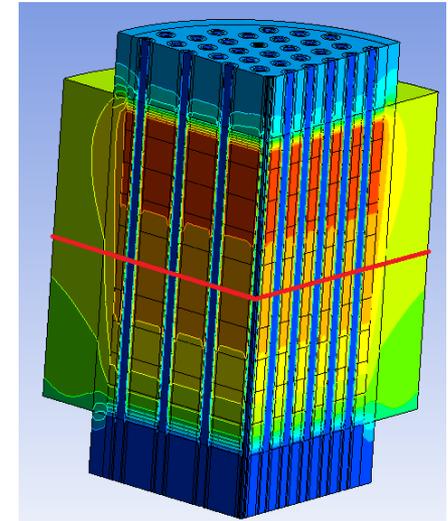
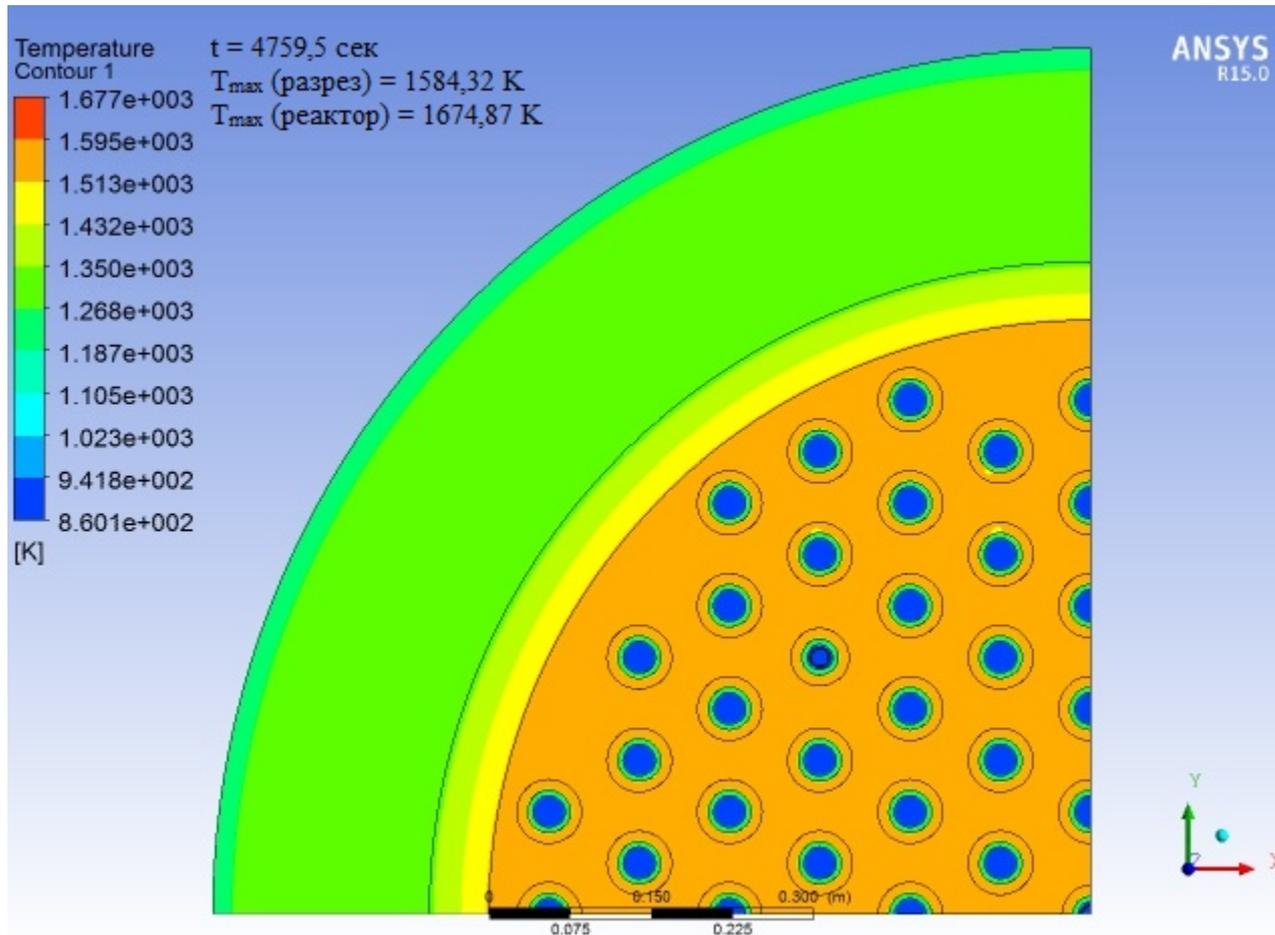


Температура, разрез – максимальная температура в разрезе реактора на уровне середины активной зоны.
Температура, реактор – максимальная температура.

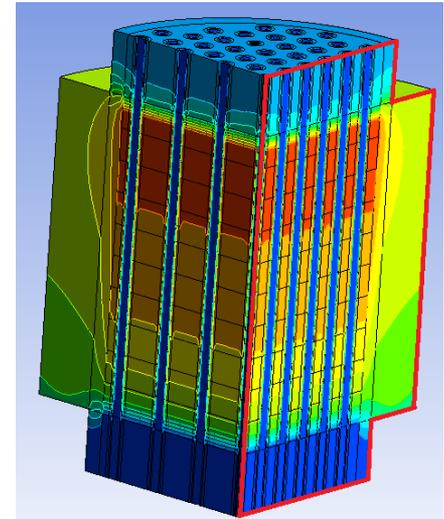
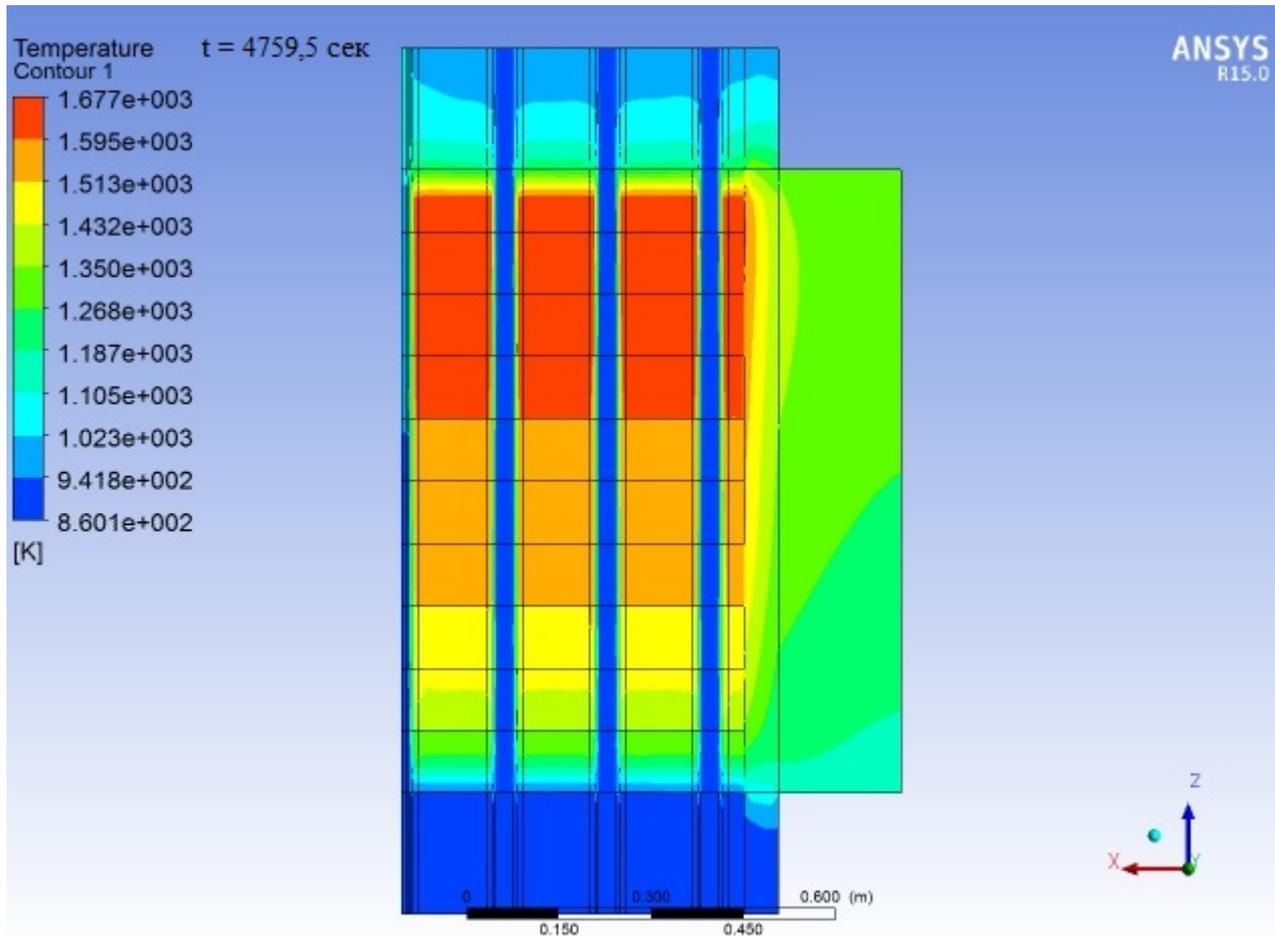


Максимальная температура реактора со временем смещается выше середины активной зоны, что связано с всплытием горячих слоев топливной соли за счет гравитационных сил.

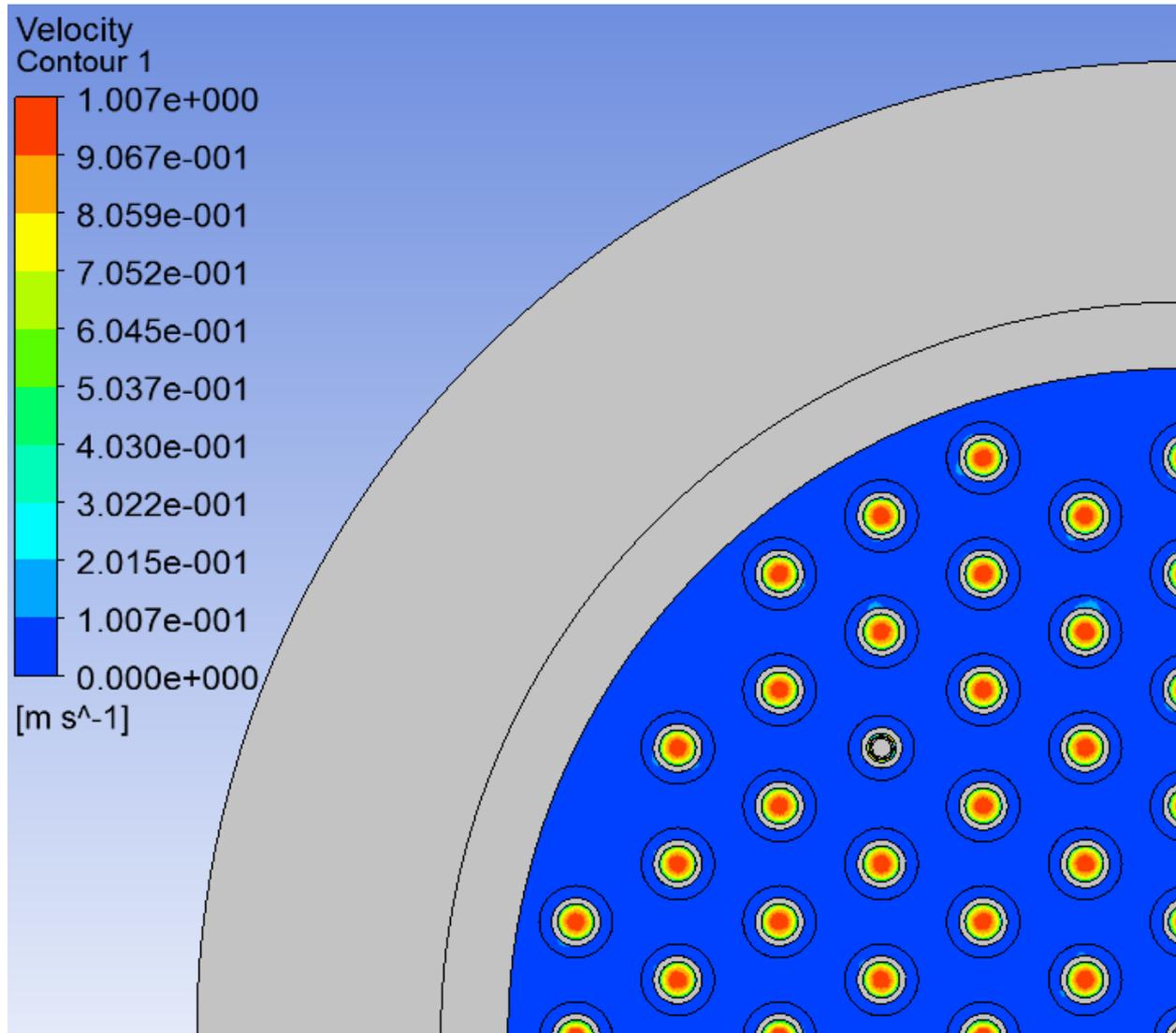
Результаты нестационарного теплогидравлического расчета. Поле температур. Часть 1



Результаты нестационарного теплогидравлического расчета. Поле температур. Часть 2



Результаты нестационарного теплогидравлического расчета. Поле скоростей



Международная конференция «XIII ЗАБАБАХИНСКИЕ НАУЧНЫЕ ЧТЕНИЯ», 20-24 марта 2017 г., Снежинск

Максимальные температуры элементов РУ

Элемент реактора	Темп, К
Стержень с теплоносителем	
Теплоноситель	1170
Оболочка	1468
Корпус реактора	1602
Стержень ПЭЛ	
Борный сердечник	1052
Гелиевый зазор	1028
Внутренняя оболочка	1029
Теплоноситель	1107
Оболочка	1425

Элемент реактора	Темп, К
Стержень АЗ	
Борный сердечник	1046
Гелиевый зазор	1046
Внутренняя оболочка	1022
Теплоноситель	1095
Оболочка	1429
Боковой отражатель	1422
Нижний отражатель	954
Верхний отражатель	1223
Топливная соль	1684

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана и реализована согласованная динамическая модель блока реактора в программном модуле ANSYS FLUENT и в программном комплексе ПРИЗМА+РИСК. Внедрен алгоритм движения органов СУЗ.

Динамическая модель позволила провести ряд связанных нейтронно-физических и теплогидравлических расчетов с целью оптимизации характеристик активной зоны.

По результатам нейтронно-физических расчетов:

- достаточно четырех стержней с поглощающим материалом (карбид бора) для контроля критичности и управления блоком;
- показана возможность работы реактора без перегрузок в течение 10 лет;
- сравнительно большая доля запаздывающих нейтронов и малый запас реактивности на выгорание позволит повысить ядерную безопасность системы.

По результатам предварительных теплогидравлических расчетов:

- были получены распределения плотностей, скоростей и температур;
- необходимо ввести в расчетную модель энерговыделение за счет поглощения гамма-квантов в материалах отражателя и поглотителя, теплообмен излучением в гелиевом зазоре.

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ

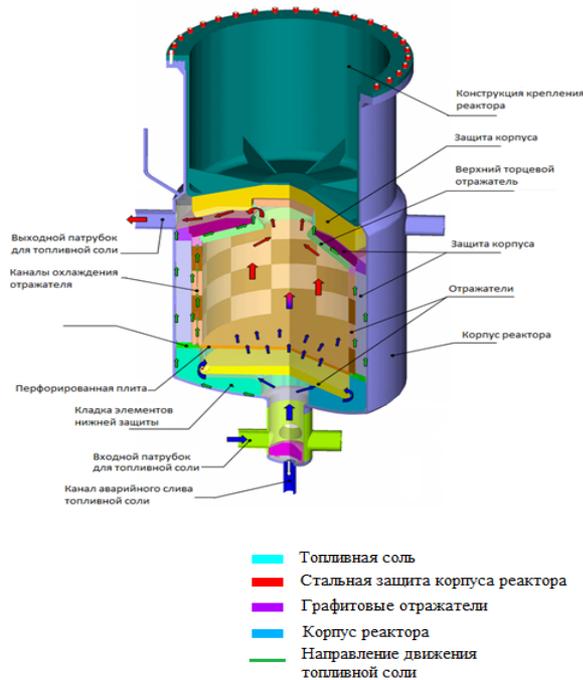
Описание установки

Блочный расплавносолевой реактор с разделением функций производства и передачи энергии представляет собой установку, состоящую из нескольких блоков. Каждый блок – цилиндрический сосуд, заполненный топливной солью. Через него проходят трубки, по которым прокачивается соль-теплоноситель, а в некоторых из них установлены органы регулирования нейтронного потока. Топливная соль – эвтектика FLiNaK с растворенным в ней UF_4 . Соль-теплоноситель – FLiNaK.

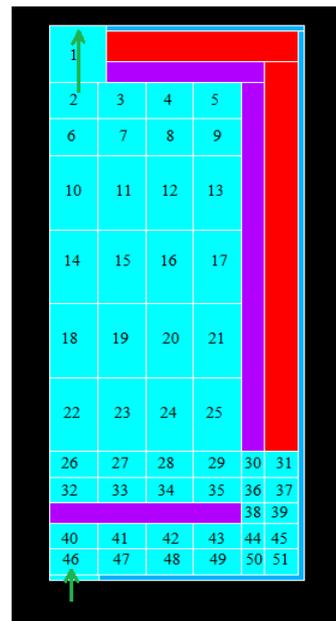
Установка снабжена нейтронными экранами, которые позволяют производить выемку блока для его замены без остановки реактора. При функционировании всех блоков нейтронные экраны подняты вверх, при необходимости замены блока они опускаются и изолируют его от остальных. Время эксплуатации блока определяется, прежде всего, коррозионной стойкостью выбранных конструкционных материалов. Такая конфигурация реактора с неподвижной топливной солью позволяет сократить количество контуров до двух: первый – соль-теплоноситель, второй – пароводяной (либо газовый).

Примеры РУ с покоящимся топливом. РУ MOSART

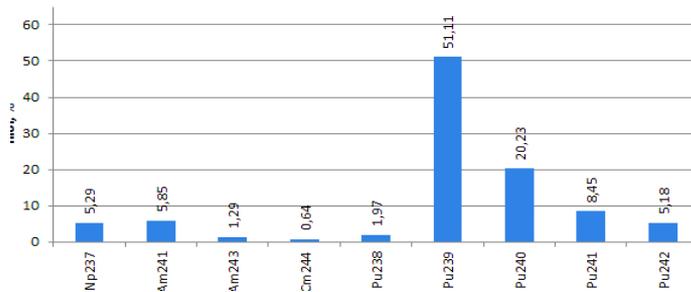
Принципиальная схема MOSART



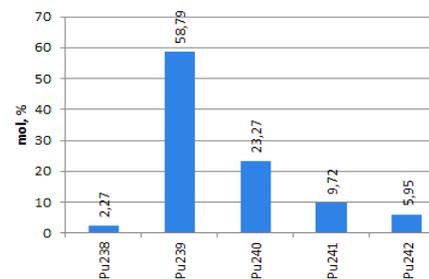
Расчетная модель MOSART



Мольная доля актинидов в топливной загрузке



Изотопный состав плутония



Методика расчета эффективной доли запаздывающих нейтронов

- определяется масса соли, покидающей АЗ, для каждой группы за среднее время запаздывания.
- рассчитывается разница масс, топливной соли, загруженной в АЗ, и соли, покидающей ее.
- определяется доля запаздывающих нейтронов с учетом движения соли путем умножения доли соответствующей группы на изменение относительной массы топлива. При этом предполагается, что, если ядро-предшественник покидает АЗ, то запаздывающий нейтрон уже не сможет внести вклад в поддержание цепной реакции (не учитывалась возможность возврата ядра-предшественника в АЗ после прохождения соли по контуру).