



Использование суперкомпьютеров для решения задач атомной промышленности

Авторы:

А.А. Аксёнов, М.Л. Сазонова (ООО «ТЕСИС», ОИВТ РАН)

О.Л. Никаноров, С.А. Рогожкин, И.Д. Фадеев (АО «ОКБМ Африкантов»)



FlowVision – это программный комплекс, позволяющий:

- моделировать движение жидкости, газа и плазмы методами вычислительной гидродинамики с учетом большого числа физических эффектов, включая турбулентность, химические превращения, многофазность, электромагнитные явления
- решать задачи движения жидкости и газа, возникающие как в промышленности, так и в научных исследованиях
- использовать для расчетов как персональные компьютеры и рабочие станции, так и суперкомпьютеры

Концепция FlowVision

- FlowVision – если я вижу течение, то я его понимаю. Расчет и визуализация онлайн.
- Автоматизация всех возможных действий пользователя => быстрое получение результатов моделирования:
 - Полностью автоматическая генерация расчетной сетки, реализация концепции «расчетная сетка есть решение»
 - Возможность уточнять решение по мере необходимости, чтобы реализовать «исследование сходимости по расчетной сетке»
 - Простой пользовательский интерфейс, реализующий создание расчетного проекта на базе концепции «геометрия -> математическая модель -> решение»
- Одномодульность программы – нет разных программ-модулей, которые реализуют разные математические модели, пре и постпроцессинг – «много моделей, много задач, но флакон один»

FlowVision для задач атомной энергетики



Связь с CAD системами

Подсеточное разрешение геометрии

Полностью автоматическая генерация расчётной сетки

Динамическая локальная адаптация

Неявный конечно-объёмный метод расщепления по физическим параметрам

Широкий спектр физических моделей (турбулентность, массоперенос, химия, горение, излучение, дисперсные фазы, VOF)

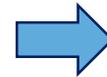
Подвижные тела

Модель зазора

Связь с конечно-элементными пакетами

Высокопроизводительные параллельные вычисления

Клиент-серверная архитектура

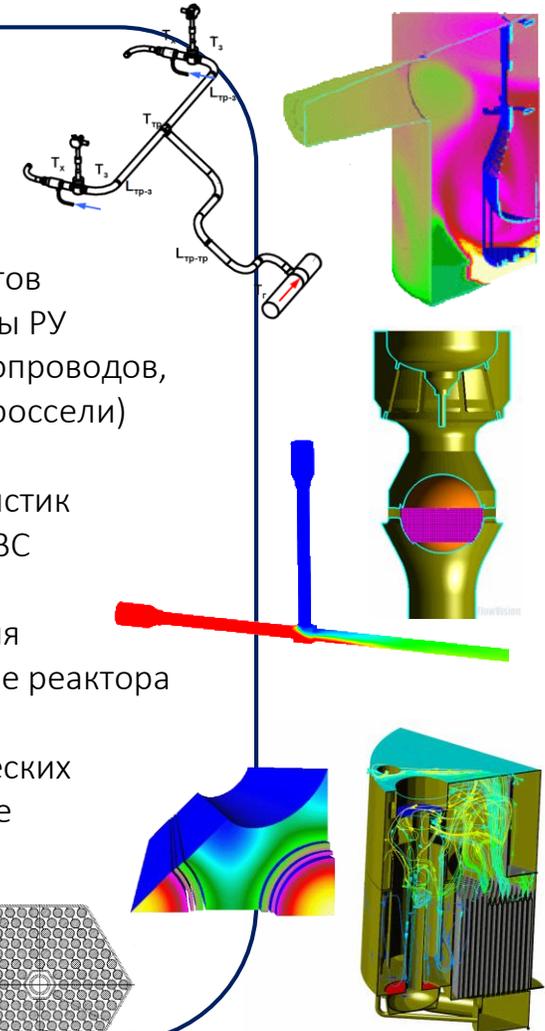
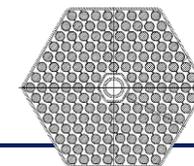


Исследование элементов трубопроводной системы РУ (прямолинейные участки трубопроводов, тройники, клапаны, дроссели)

Исследование характеристик теплообменников и ТВС

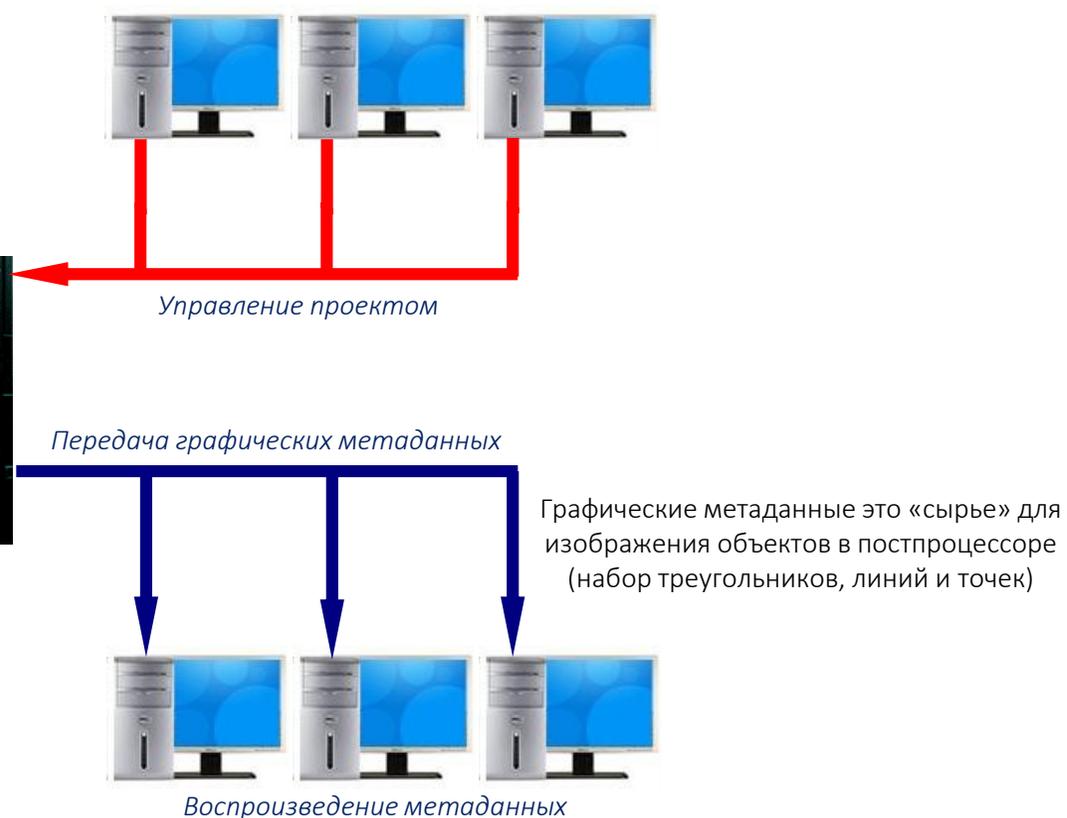
Исследование течения в верхней смесительной камере реактора

Анализ теплогидравлических процессов в реакторе



Клиент-серверная архитектура

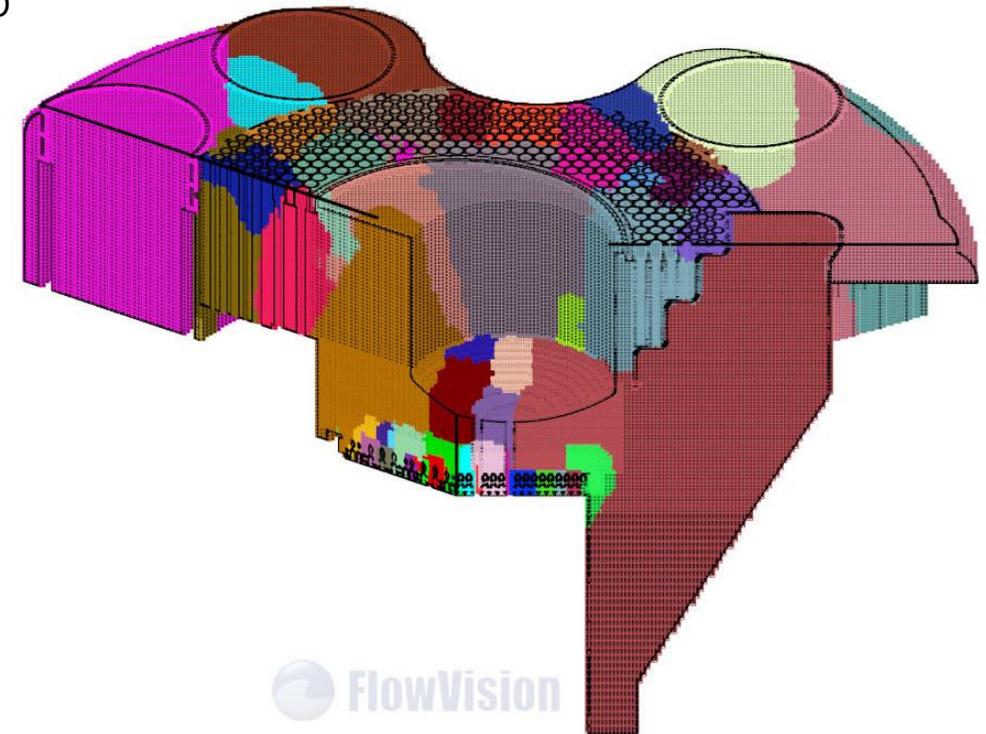
- Пользователь Windows может легко работать на Linux кластере без каких-либо знаний Linux
- Несколько пользователей могут одновременно работать с одним проектом FlowVision



- Быстрая визуализация CFD результатов, полученных на кластере
- Возможность визуализации больших проектов FlowVision для нескольких потребителей

FlowVision для больших задач

- Реальные задачи – $n \cdot 10^8$ ячеек
- Количество используемых ядер $> m \cdot 10^4$
- Оптимальное количество ячеек – 5-10 тыс. на ядро
- Распараллеливание по общей и распределенной памяти одновременно
- Работает по управлению Linux, Windows
- Платформа – Intel, Эльбрус



Модель турбулентного теплопереноса для натриевого теплоносителя

Создание модели турбулентного теплопереноса LMS

- Разработка и реализация модели турбулентного переноса тепла, учитывающей специфику натриевого теплоносителя
 - обзор и анализ опубликованных моделей турбулентного теплопереноса
 - выбор наиболее надёжных и легко реализуемых моделей
 - создание на их основе новой модели LMS (Liquid Metal Sodium), позволяющей получить точный результат в разумные сроки



- Модифицированная модель Sommer&So
- Выражение для турбулентного числа Прандтля
- Поправка в тепловом потоке, учитывающая гравитационную анизотропию
- Тепловая пристеночная функция



Верификация модели LMS и аттестация FlowVision

Верификация и валидация выполняются на основе сравнения:

- с аналитическими и теоретическими решениями,
- с аналогичными результатами, полученными по ранее аттестованным программным средствам,
- с результатами экспериментальных исследований,
- с данными реакторных установок.

Аттестацию программного средства проводит ФБУ «НТЦ ЯРБ» от лица Ростехнадзора (Приказ Ростехнадзора № 450 от 20.09.2018).

Основным документом, обосновывающим информацию, содержащуюся в аттестационном паспорте, является отчет о верификации программного средства.

Процедура аттестации



Аналитическая база для верификации

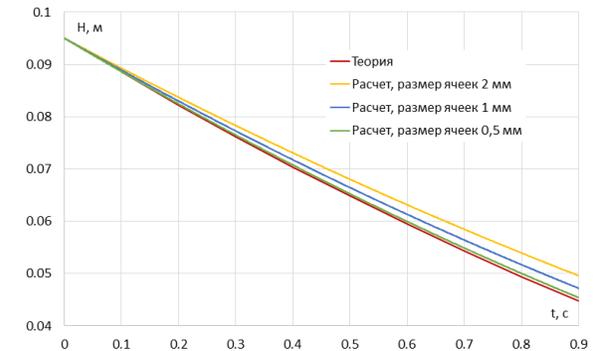
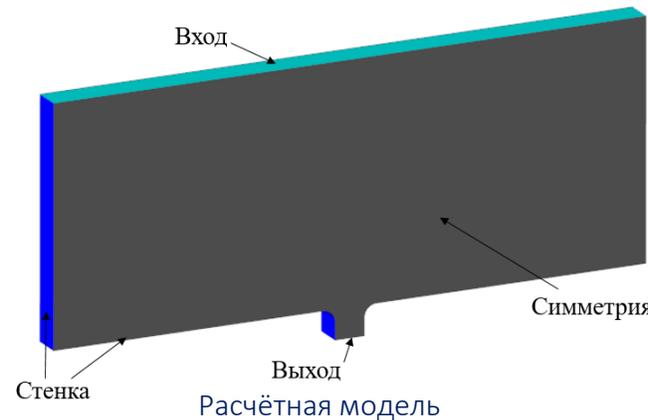
Гидравлические тесты

- обтекание тонкой пластины
- ламинарное и турбулентное течение в трубе
- турбулентное течение через колено трубопровода
- турбулентное течение через дроссельную шайбу
- истечение жидкости из сосуда
- турбулентное течение в квадратном канале

Теплогидравлические тесты

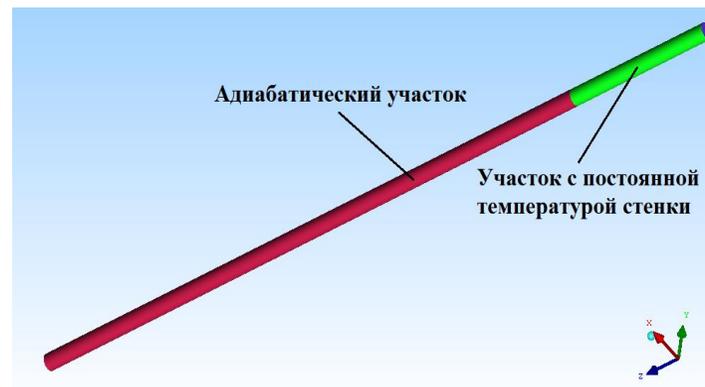
- течение натрия в трубе с охлаждением

Истечение жидкости из сосуда

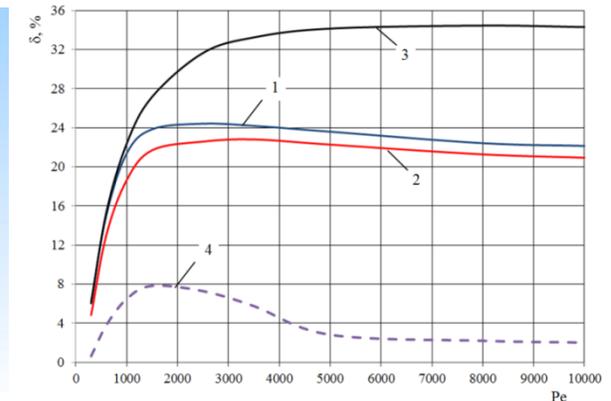


Изменение уровня жидкости со временем

Течение натрия в круглой трубе с охлаждением ($T_{вх}=550\text{ °C}$, $t_{ст}=150\text{ °C}$)

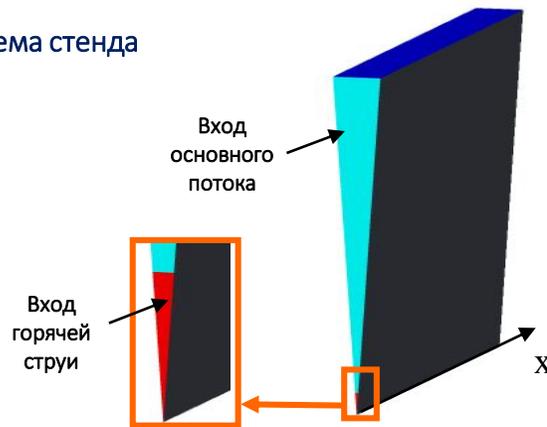
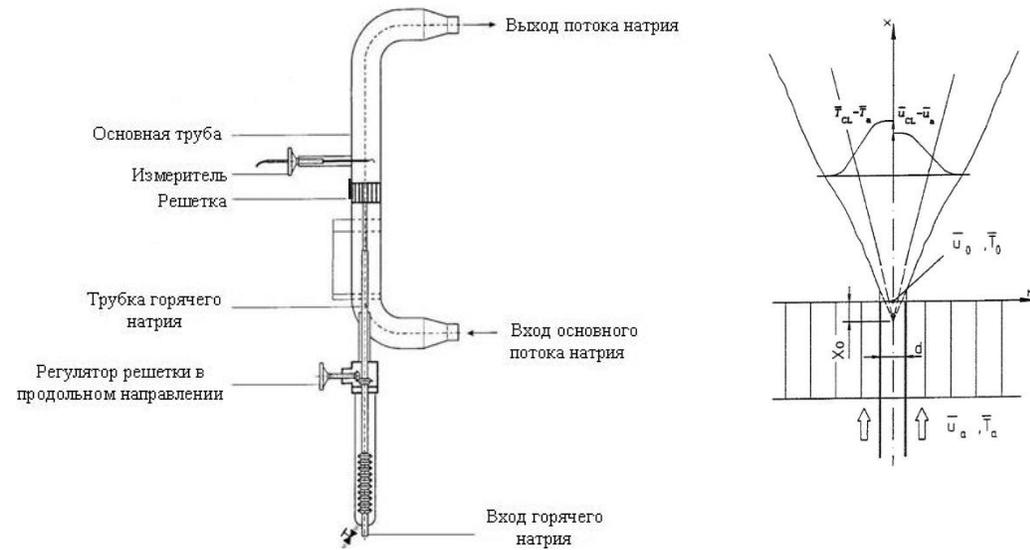


Расчётная модель

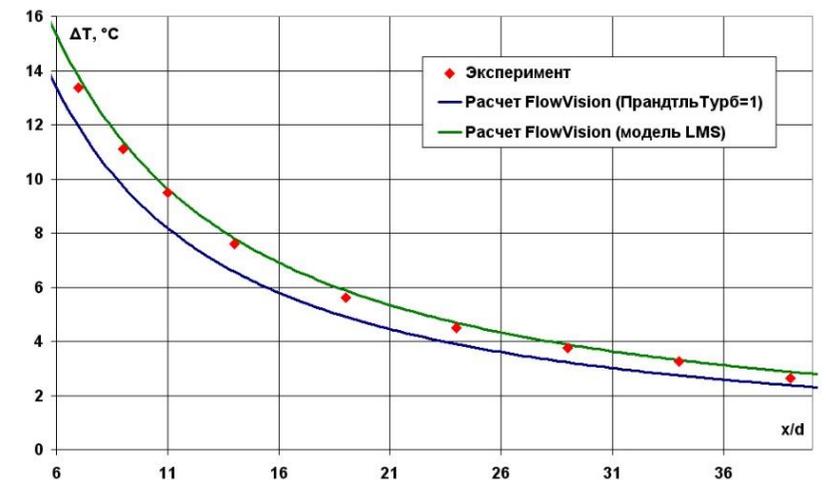
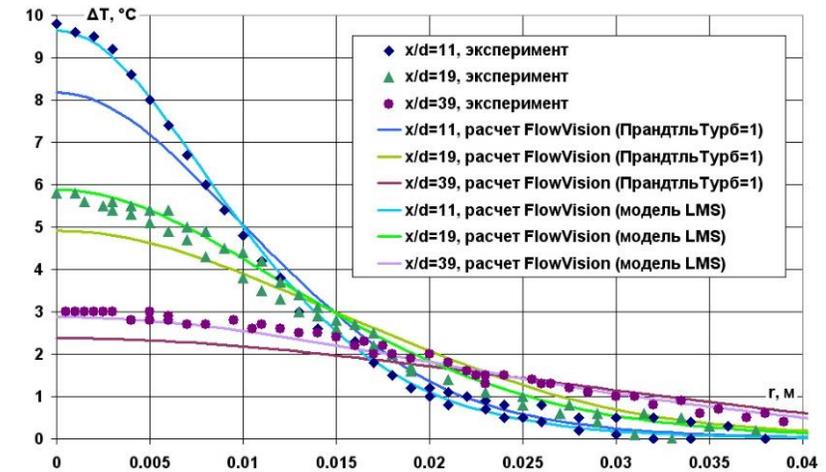


Погрешность расчёта средней температуры натрия на выходе из трубы: FlowVision (1), STAR-CCM+ (2), ANSYS CFX (3), FlowVision с LMS (4)

Экспериментальные данные из открытых источников

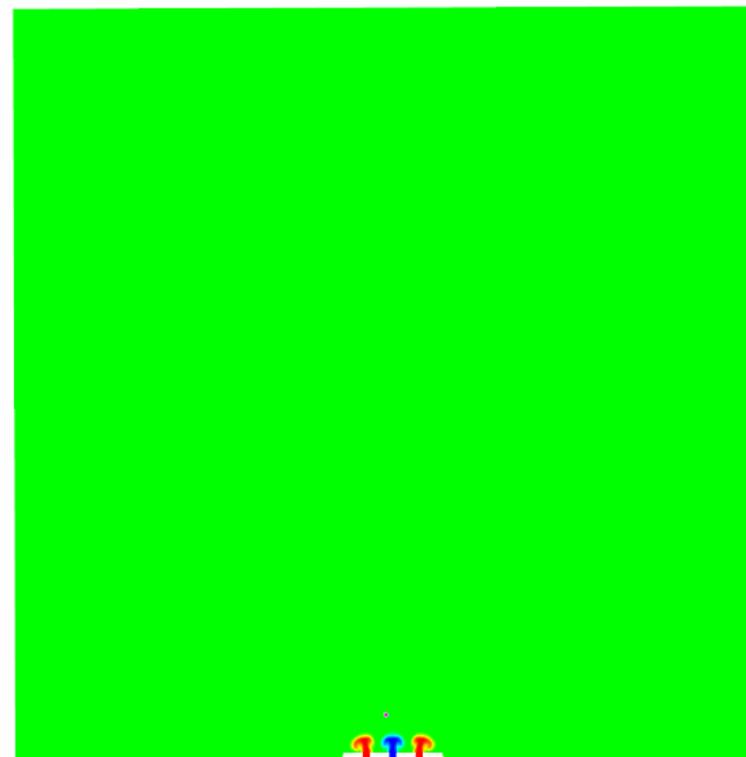
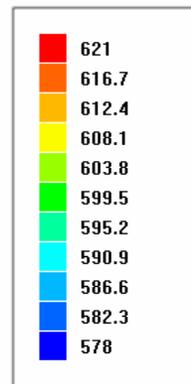
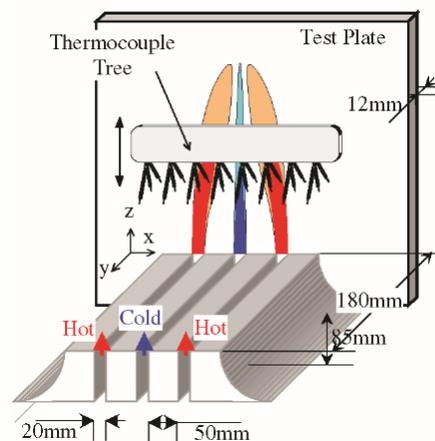


Расчётная область



Распределение температуры

Экспериментальные данные из открытых источников




Относительная погрешность средней нормированной температуры в контрольных точках

Положение датчика, мм	Относительная погрешность, %
-1.5	≈4.7
-0.25	≈6.2
0.5	≈0.2
90	≈0.7



Распределение температуры

Дополнительные экспериментальные исследования

Для получения недостающих для верификации данных в ИМСС УрО РАН (г. Пермь) по заказу АО «ОКБМ Африкантов» спроектирован, изготовлен и введен в эксплуатацию натриевый стенд.



Конвективное течение натрия в трубе ($l/d=5$)
при различных углах наклона



Конвективное течение натрия в трубе ($l/d=20$)
при различных углах наклона



Перемешивание разнотемпературных потоков натрия в тройнике



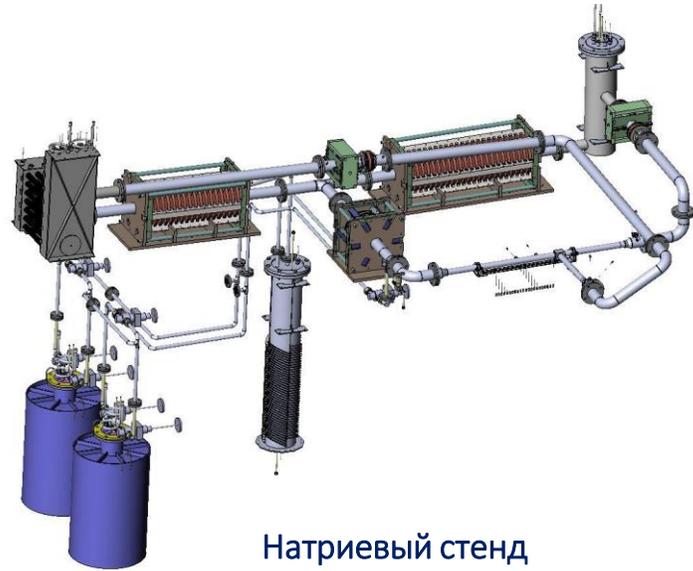
Перемешивание разнотемпературных потоков натрия за перегородкой в канале



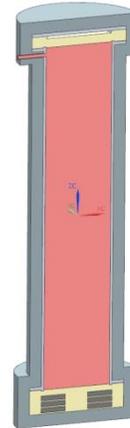
Перемешивание разнотемпературных потоков натрия в смесителе



Дополнительные экспериментальные исследования



Натриевый стенд

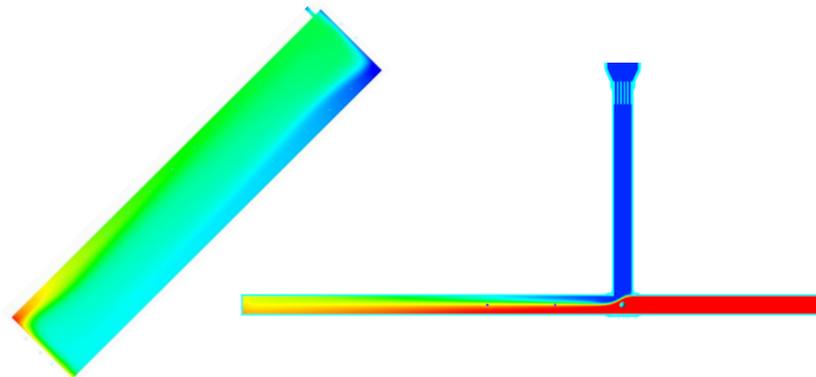


Условия проведения эксперимента (тройник)

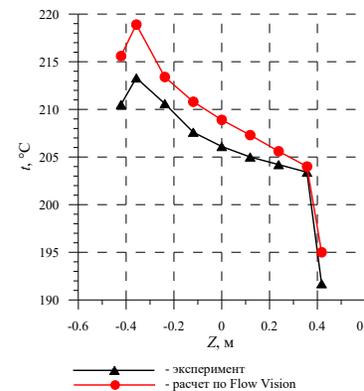
Номер режима	Q_r , мл/с	Q_x , мл/с	T_r , °C	T_x , °C
1	1040	490	207	153,4
2	556	231	222,1	126,3
3	915	830	184,9	140,8



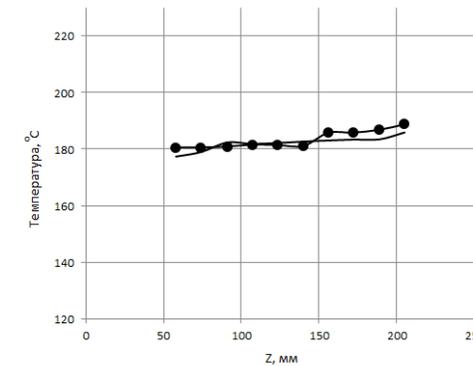
Расчётные модели рабочих участков



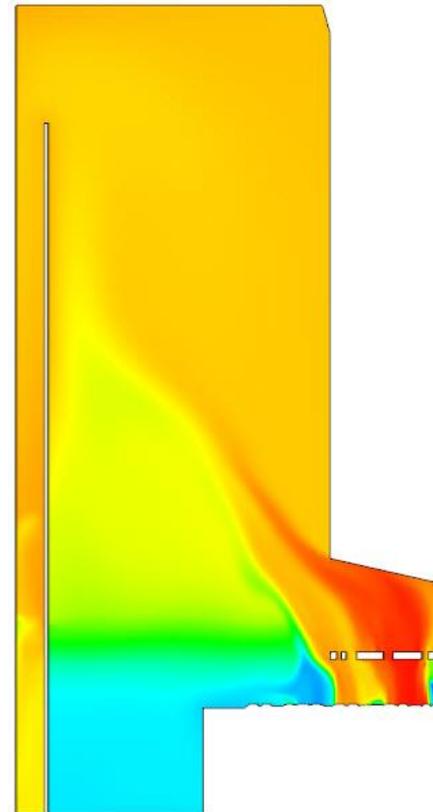
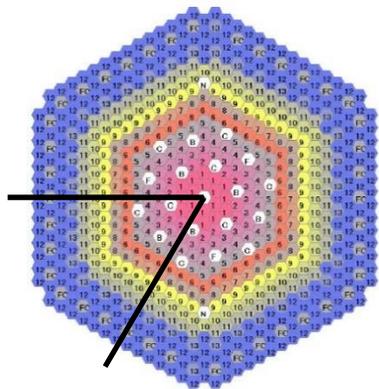
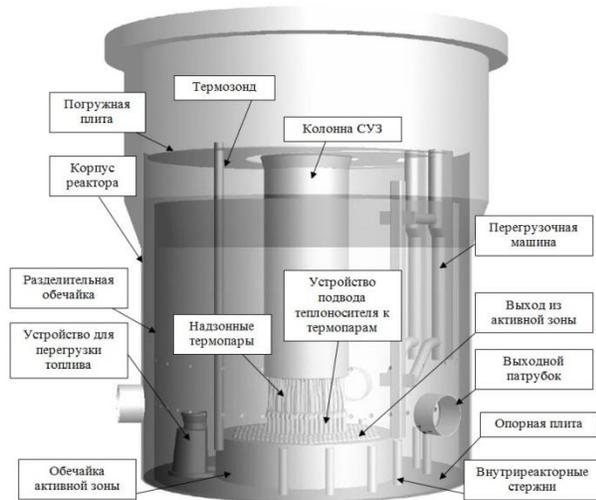
Распределения температур



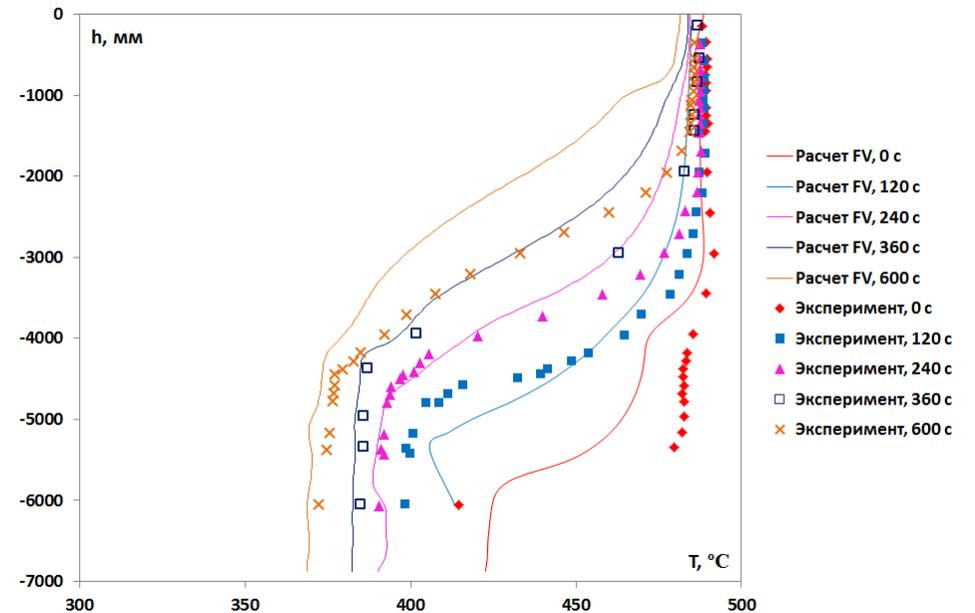
Изменения средней температуры вдоль оси Z



Данные с реакторных установок



Распределение температуры
Номинальный режим



Распределение температуры по высоте камеры
в режиме расхолаживания

Данные с реакторных установок

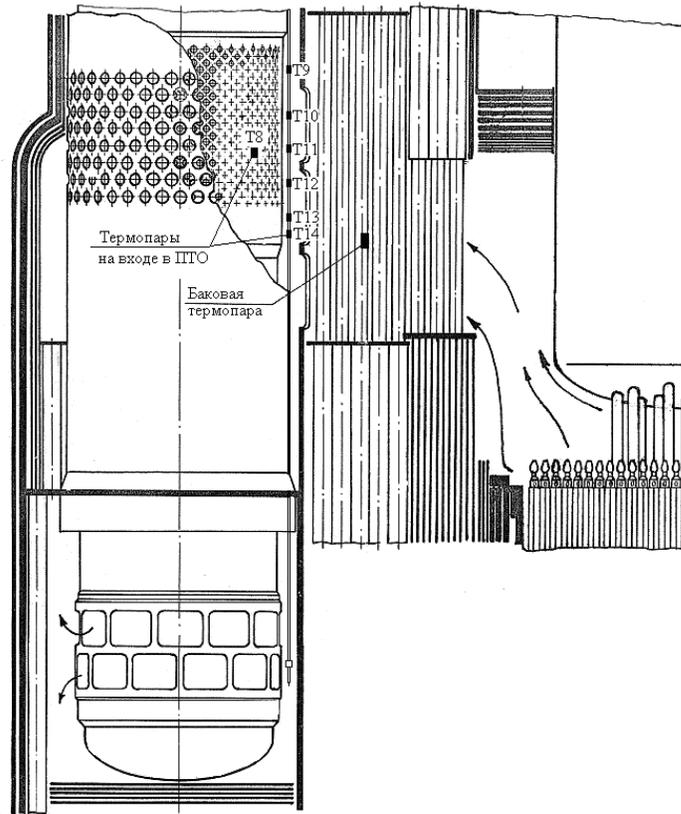
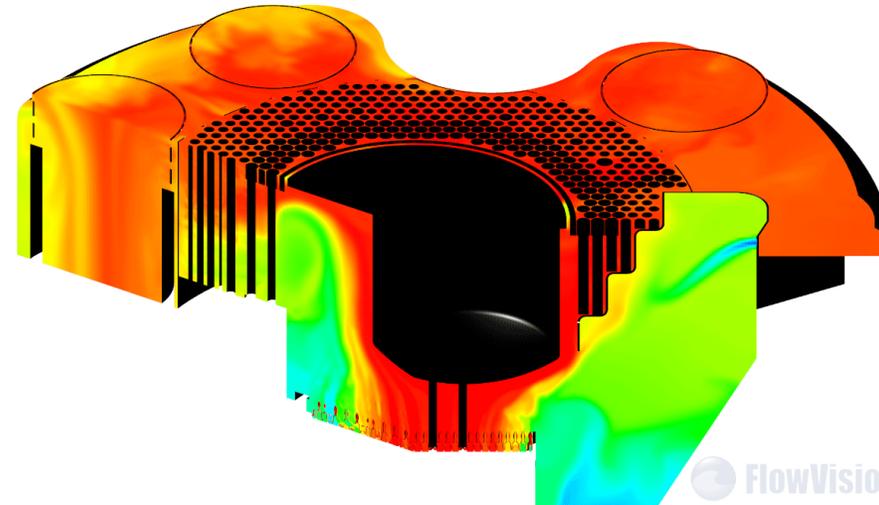
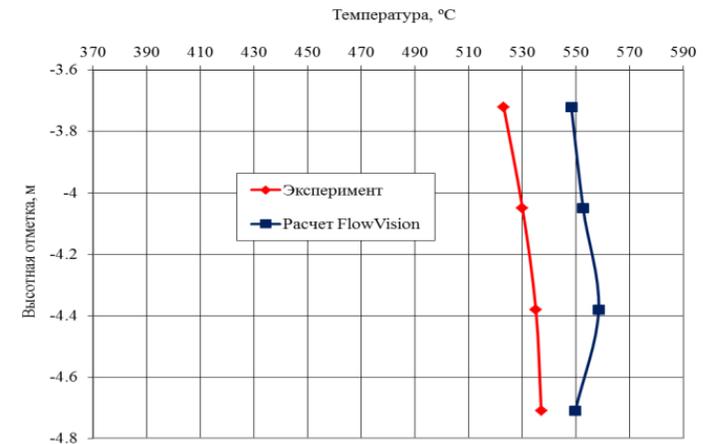
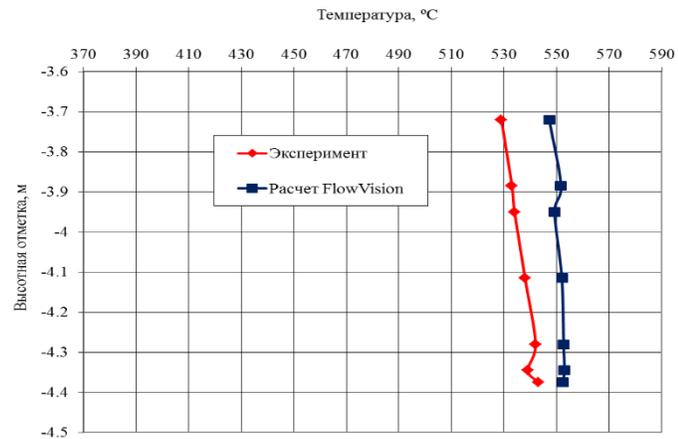


Схема расположения термопар на входе в ПТО



Распределение температуры



Результат аттестации FlowVision

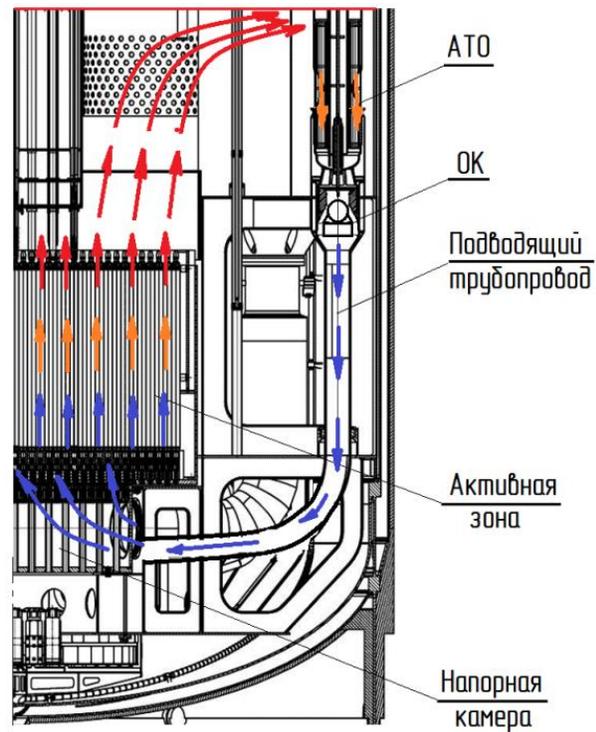
- По результатам экспертизы и доработки верификационных материалов решением Совета по аттестации при Ростехнадзоре АО «ОКБМ Африкантов» выдан **аттестационный паспорт на ПС FlowVision**
- FlowVision аттестован для моделирования теплогидравлических процессов, происходящих при течении натриевого теплоносителя в реакторных установках на быстрых нейтронах (РУ БН)
- Для численного моделирования с помощью ПС FlowVision теплогидравлических процессов, происходящих в РУ БН, используется стандартная модель турбулентности k-ε совместно с моделью турбулентного теплопереноса LMS, учитывающей специфику натриевого теплоносителя



Исследование работы САОТ при расхолаживании РУ БН

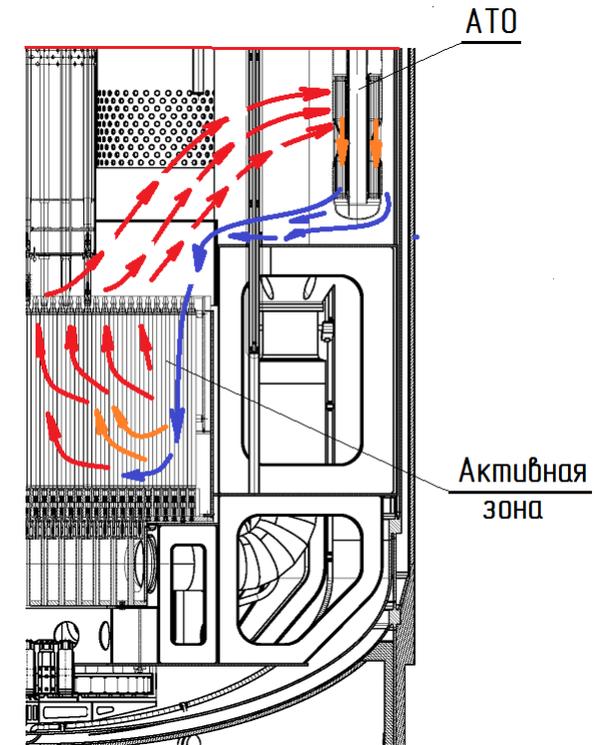
Варианты расхолаживания реактора БН

Проектный



Циркуляция теплоносителя через АТО с обратным клапаном и подводящий трубопровод, соединяющий АТО и напорную камеру реактора

Альтернативный

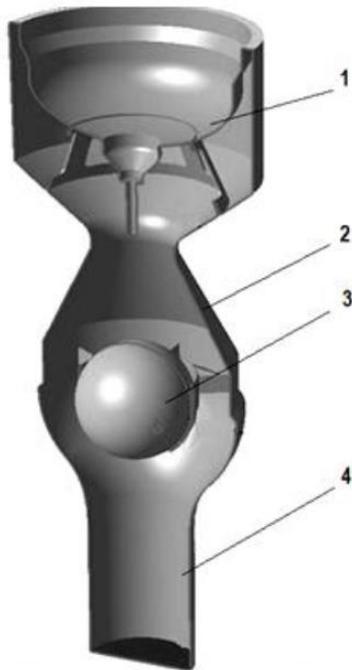


Контур циркуляции, при котором охлажденный в АТО теплоноситель первого контура омывает ТВС снаружи, отводя тепло через их чехлы

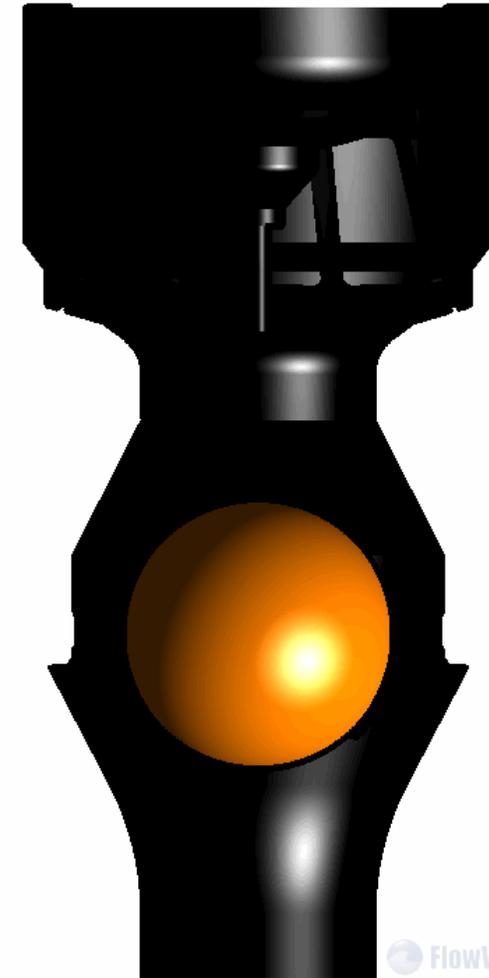
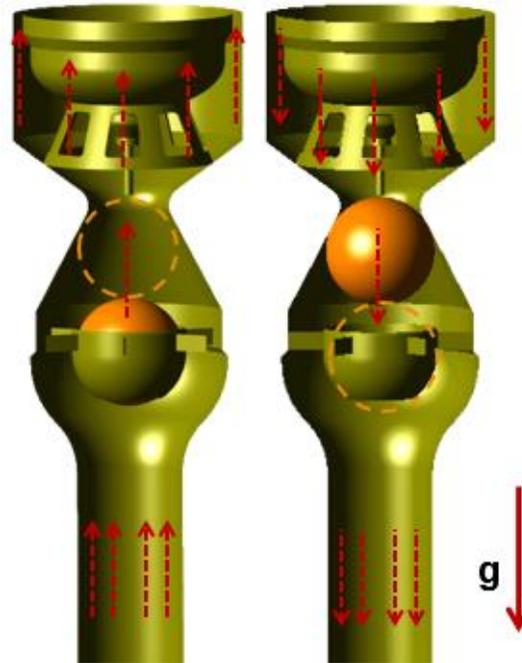
Исследование гидродинамики обратного клапана САОТ

Моделирование работы ОК и оптимизация конструкции

- Анализ гидродинамических процессов в проточной части ОК
- Определение гидравлических характеристик клапана
- Исследование условий страгивания запирающего элемента

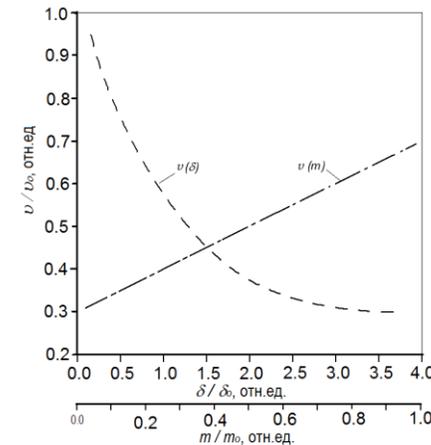
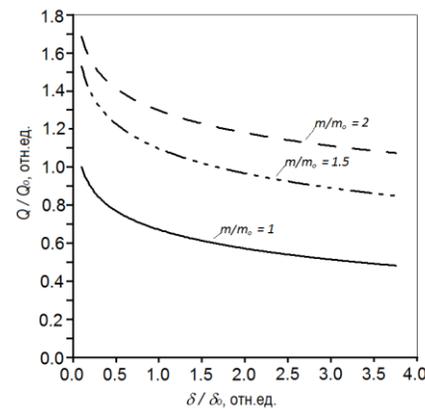
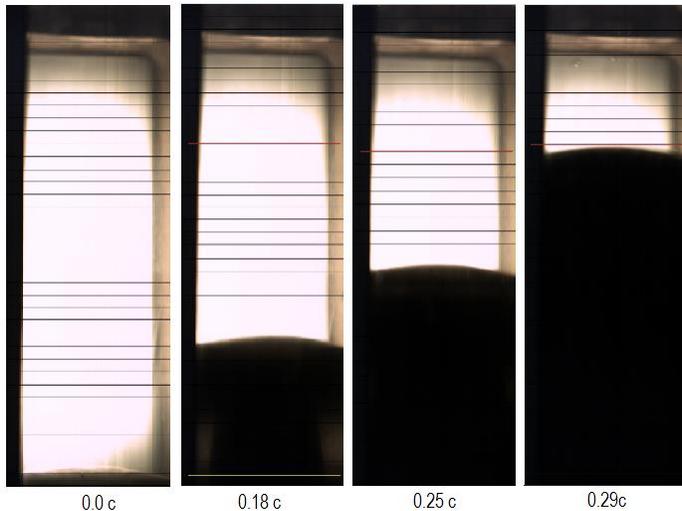
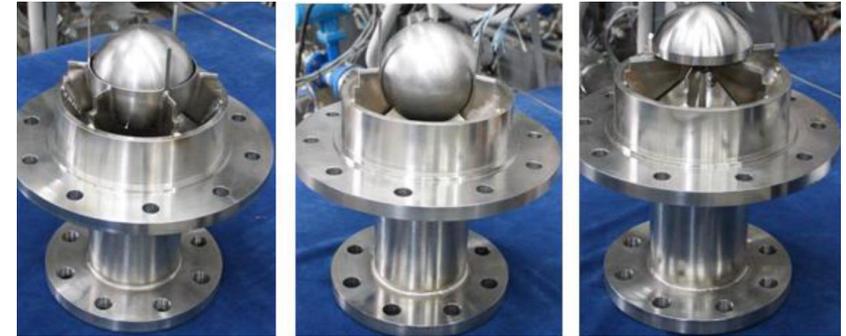


1 – днище теплообменника; 2 – проточная часть клапана;
3 – запирающий элемент; 4 – подводящий трубопровод



Исследование упрощенной модели ОК в масштабе 1:5

- Экспериментальные исследования с возможностью визуального наблюдения за поведением запирающего элемента модели клапана
- Расчёты гидродинамических характеристик моделей ОК на стадиях постановки, обоснования и анализа экспериментальных исследований
- Верификация расчётной методики

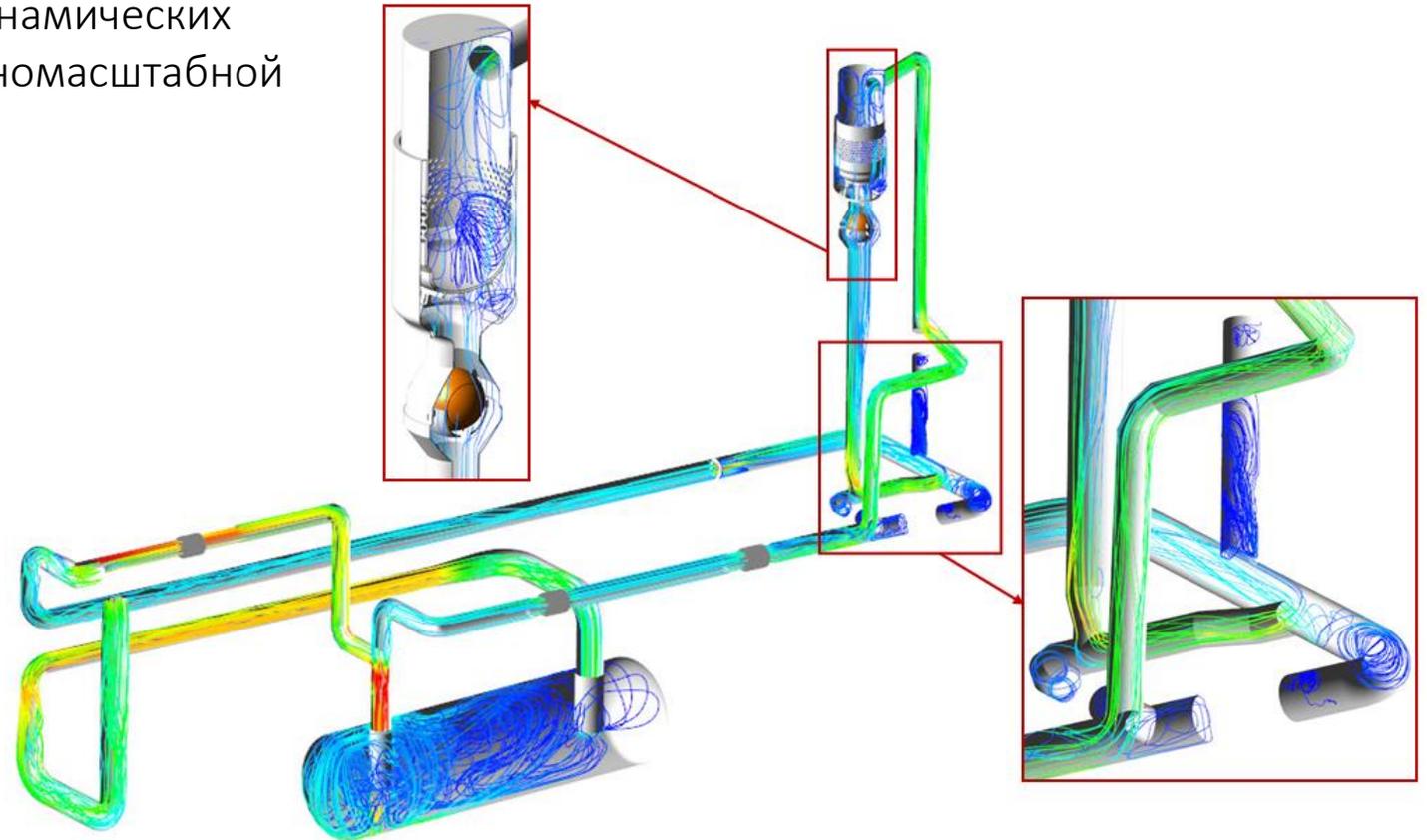
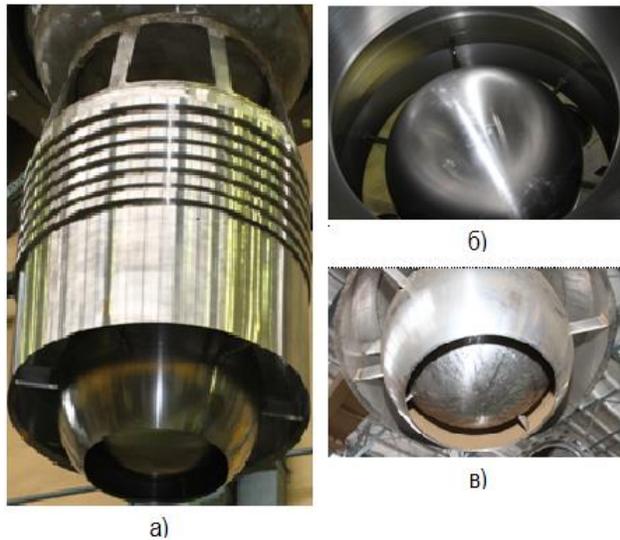


Q_0, δ_0, m_0, v_0 - расход закрытия, зазор между шаром и опорной чашей, масса и скорость запирающего элемента при закрытии для принятой конструкции клапана

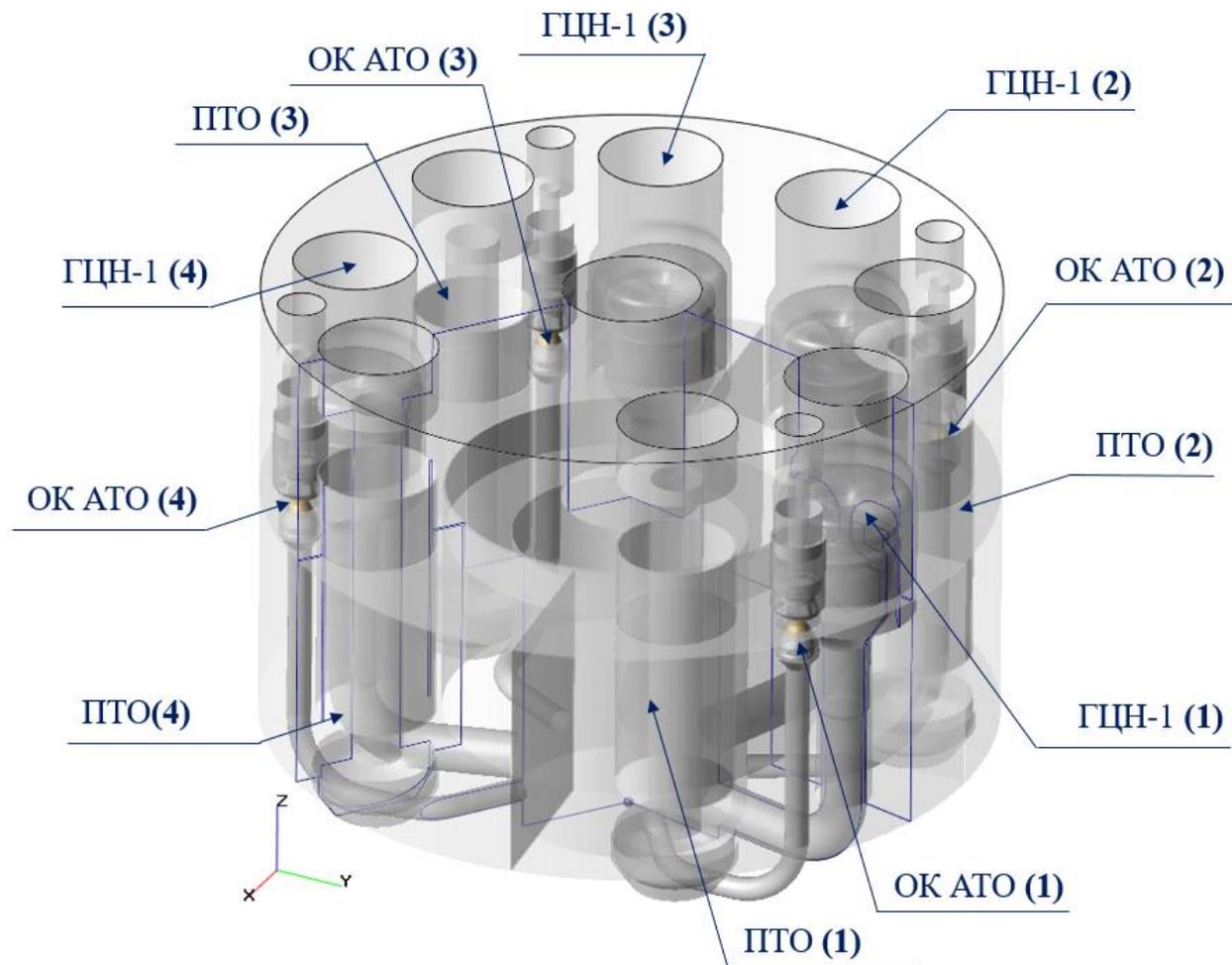
Параметр	Отличие, %
Расход закрытия	1,5 – 19
Скорость соударения	12
Перепады давления	1 – 24

Исследование полномасштабной модели

- Испытания полностью геометрически подобной модели ОК в масштабе 1:1
- Подтверждение работоспособности конструкции клапана при расходах воды, соответствующих штатным расходам в системе аварийного отвода тепла реактора
- Анализ нестационарных гидродинамических характеристик при закрытии полномасштабной модели обратного клапана



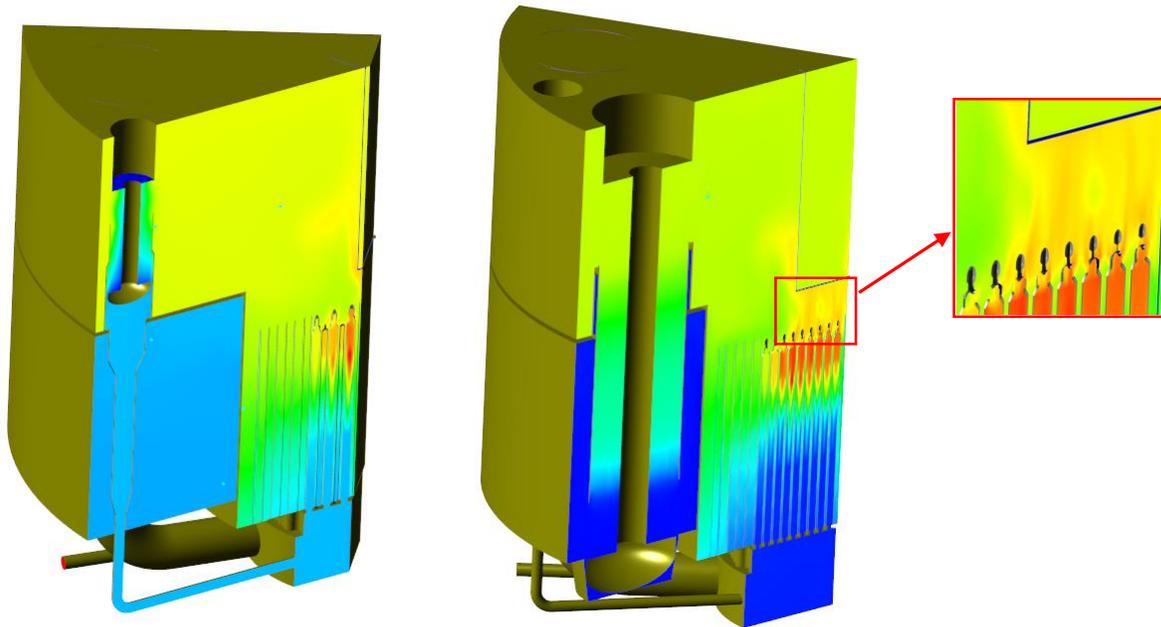
Моделирование работы ОК в составе реактора



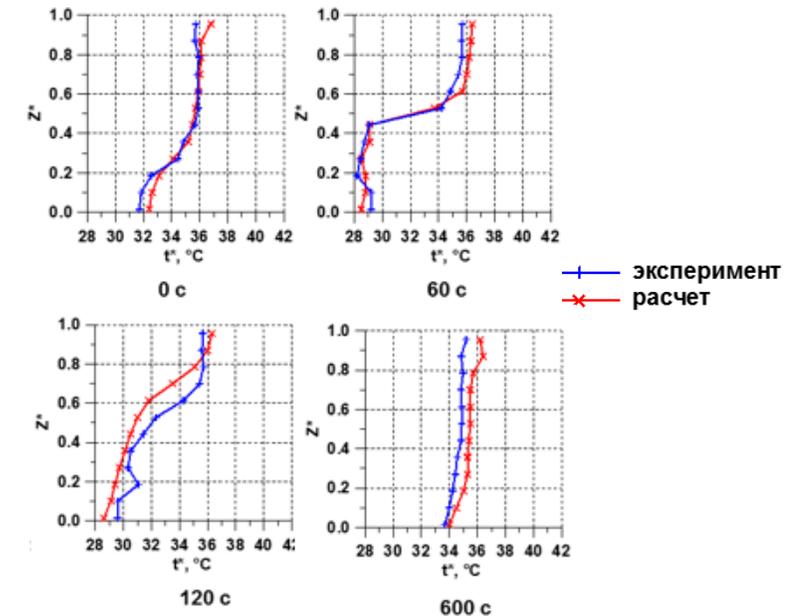
- Модификаторы сопротивления для областей АЗ, АТО и ПТО
 - Модификатор объёмной силы для моделирования работы ГЦН-1
 - Модель VOF для границы раздела «теплоноситель - газ»
 - Запирающий элемент ОК – подвижное тело
 - Модель зазора
- ↓
- Определение изменения характеристик гидравлического контура реактора при пуске ГЦН-1 и срабатывании ОК АТО
 - Получение данных о взаимном влиянии изменений давления и расходов теплоносителя в элементах первого контура при закрытии ОК каждой из четырех петель САОТ

Моделирование процесса расхолаживания реактора БН

- Создание методики расчётного анализа теплогидравлических процессов в реакторе
- **Верификация методики** по данным, полученным в АО «ОКБМ Африкантов» на экспериментальной модели реактора БН, входящей в состав стенда «ТИСЕЙ»



Распределение температуры теплоносителя в камере модели реактора в режиме расхолаживания



Изменение относительной температуры воды в верхней камере

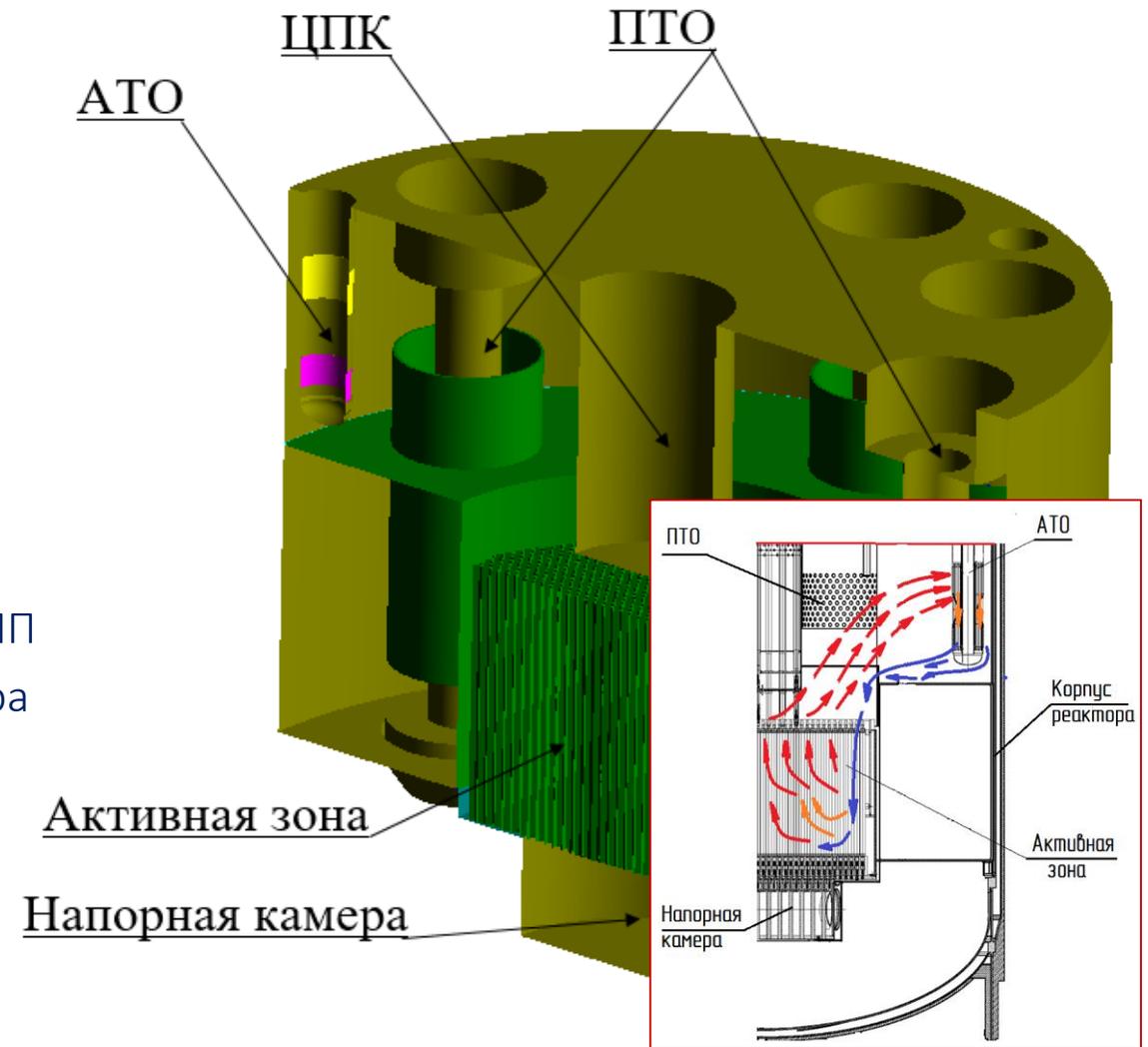
Моделирование процесса расхолаживания реактора БН через межпакетное пространство

Актуальность

- Анализ расхолаживания с точки зрения не превышения пределов безопасной эксплуатации.
- Цель проекта: определить тракты естественной циркуляции теплоносителя в реакторе и максимальную температуру теплоносителя в области активной зоны
- Сложности проекта: огромное количество деталей, малые зазоры, большие времена расхолаживания.
- Максимально доступная детализация == использование ресурсов доступных НРС-компьютеров за практическое время (порядка 100 процессоров, время расчета – около недели).
- Обзор литературы показывает, что подобные задачи решаются методами CFD двумя подходами:
 - Представление активной зоны как пористого тела – нет возможности детализировать сложную конструкцию тепловыделяющих сборок
 - DNS моделирование (миллиарды ячеек) с «неприличным» временем расчета и, все равно, относительно грубой сеткой.
- Подход, используемый в данной работе на базе FlowVision
 - Относительно грубая сетка (<50 млн ячеек)
 - Использование полуэмпирических подсеточных моделей течения и теплопереноса (модель зазора)
 - Использование метода подсеточного разрешения геометрии

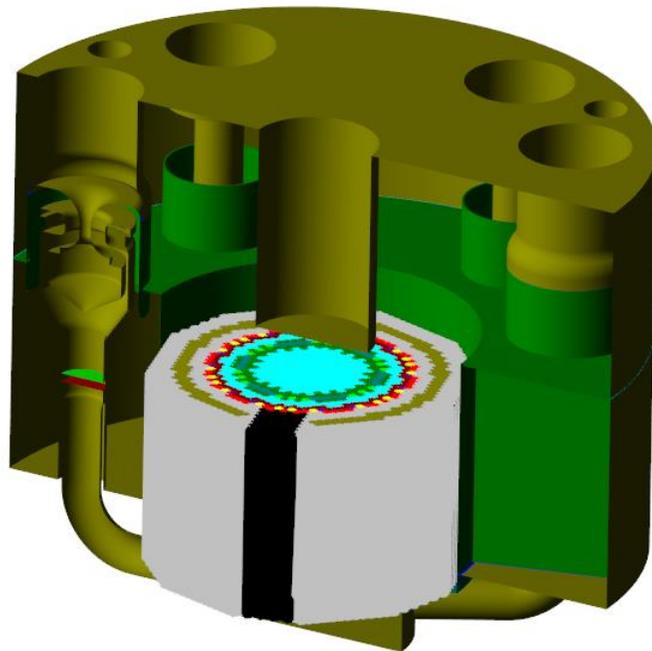
Методика исследования

- Разработан подход для моделирования активной зоны реактора:
 - внутренняя конструкция ТВС заменяется на гидравлическое сопротивление
 - внутри ТВС задаются тепловые источники
 - конструкция шестигранных чехлов ТВС учитывается явным образом
 - рассчитывается теплопередача через твердотельные чехлы ТВС
 - моделирование тепломассопереноса в МПП выполняется с применением модели зазора
- Количество расчетных ячеек – около 30 млн. Это гораздо меньше, чем при явном разрешении всех деталей активной зоны (несколько миллиардов ячеек и расчетные времена - несколько месяцев)

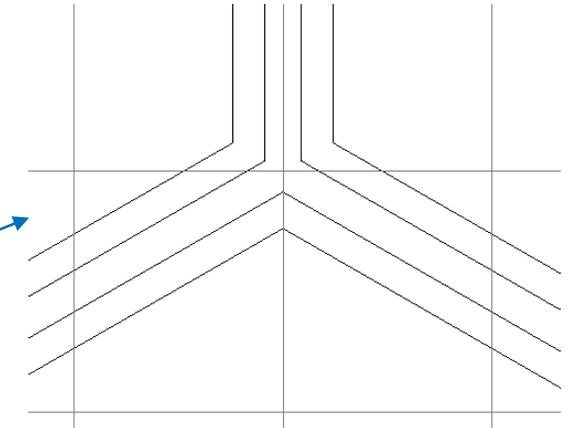
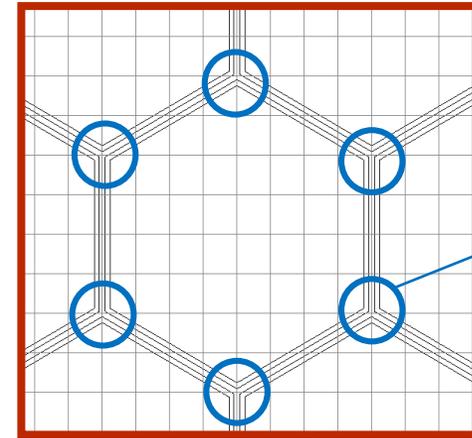


Моделирование области АЗ

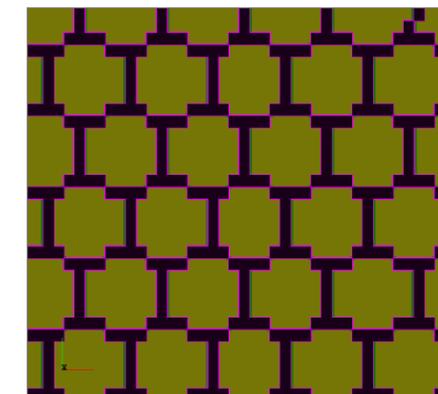
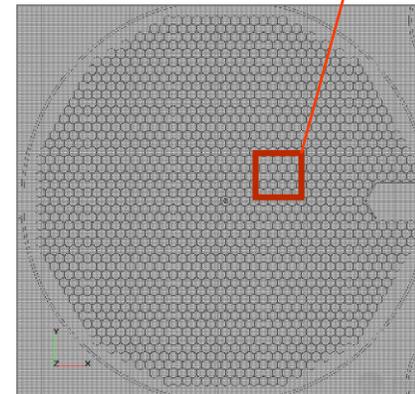
- Гидравлическое сопротивление внутри ТВС
- Теплопередача через чехлы ТВС
- Модель зазора для течения в МПП



Область сопротивлений АЗ



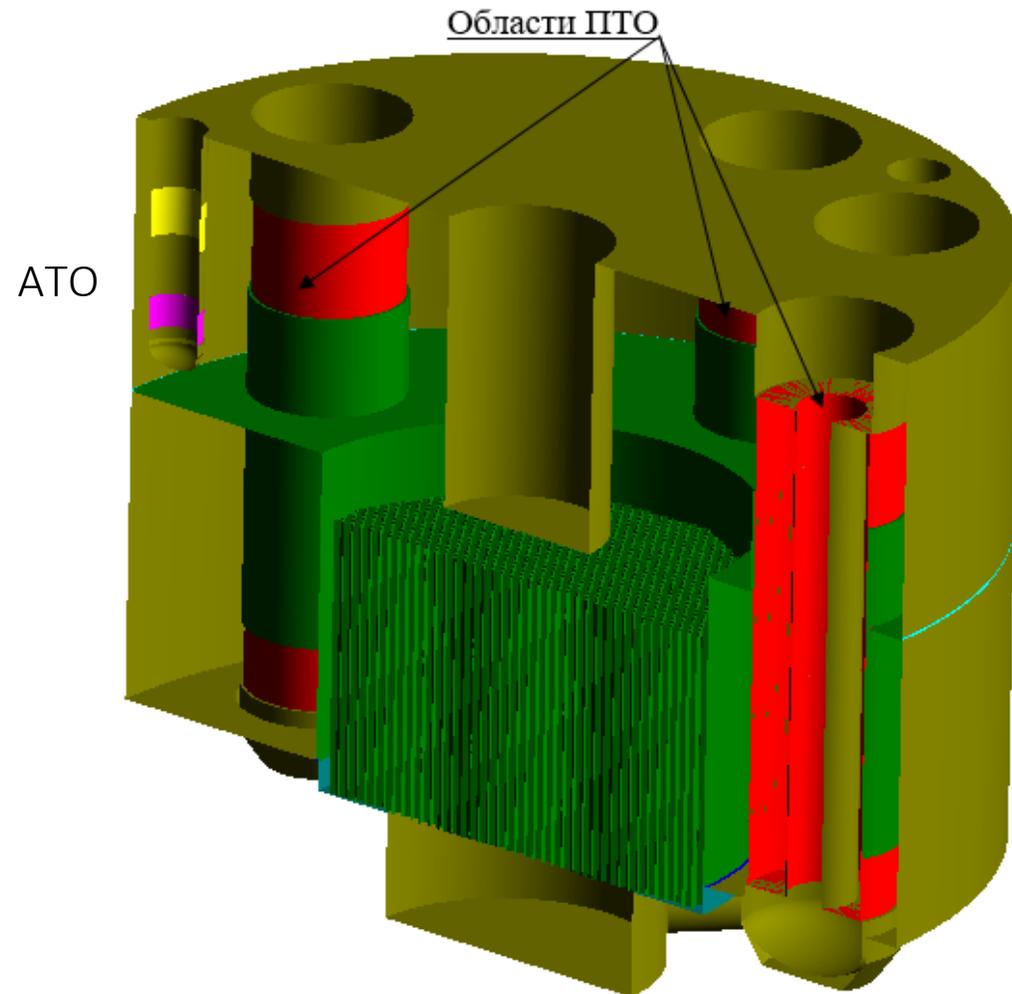
Построение сетки для корректного определения ячеек зазора



Ячейки зазора

- Общее количество расчетных ячеек 28,4 млн.
- Время расчёта номинального режима – 7 суток, режима расхолаживания – 18 суток (128 6-ядерных процессоров)

Моделирование теплообменников

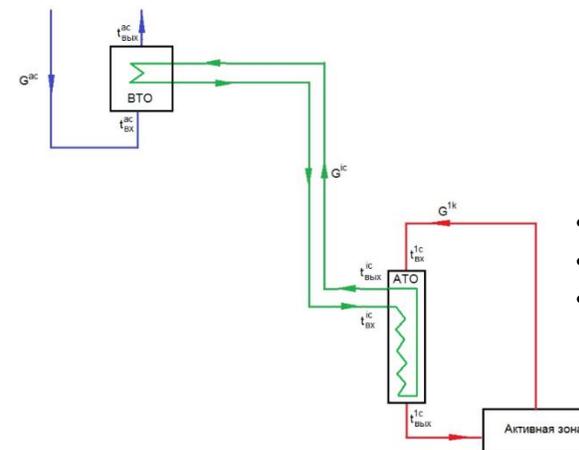


ПТО

- Номинальный режим: объемный сток энергии
- Аварийное расхолаживание: модель массивного холодильника – поглощение тепла массой металлоконструкции ПТО и массой натрия второго контура. Задание с помощью пользовательских соотношений

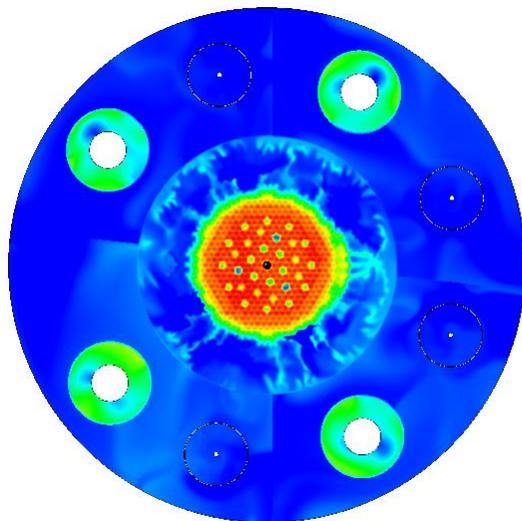
АТО

- Через подключаемую подпрограмму. Модель теплообменника, разработанная ОКБМ

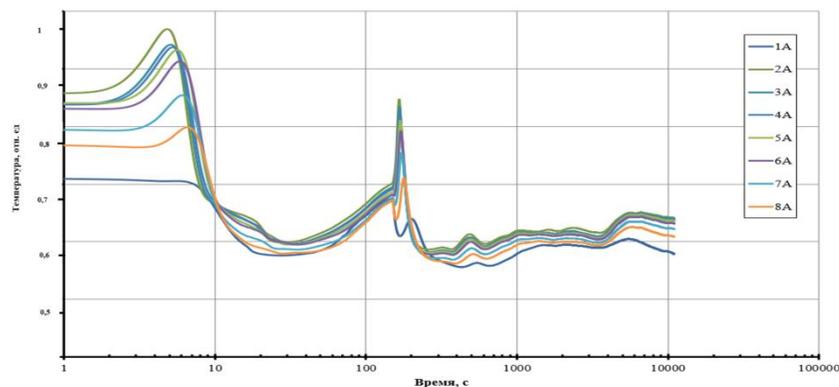


- Три контура охлаждения
- Два первых – натрий
- Последний контур - воздушный

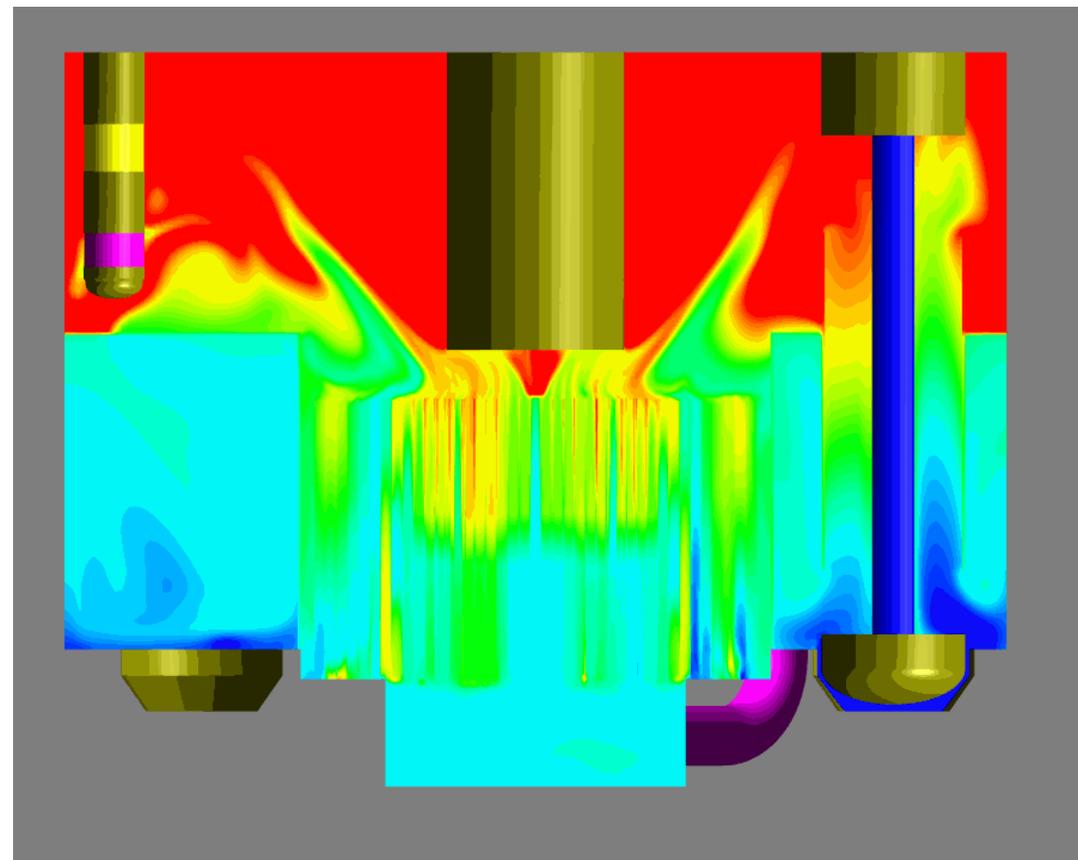
Результаты моделирования расхолаживания через МПП АЗ



Распределение температуры на выходе из АЗ в номинальном режиме



Температура на выходе из сборок в режиме расхолаживания



Изменение температуры
в режиме аварийного расхолаживания

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!