



АТОМПРОЕКТ

Предприятие
Госкорпорации «Росатом»

Инновационное проектирование

Безлепкин Владимир Викторович
Директор по науке и инновациям

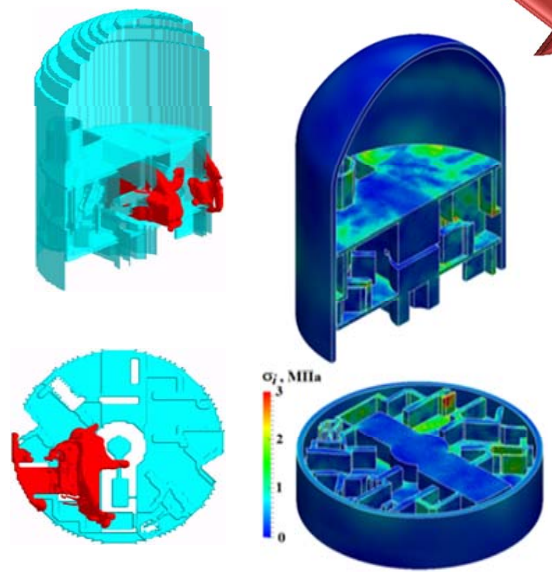
2016

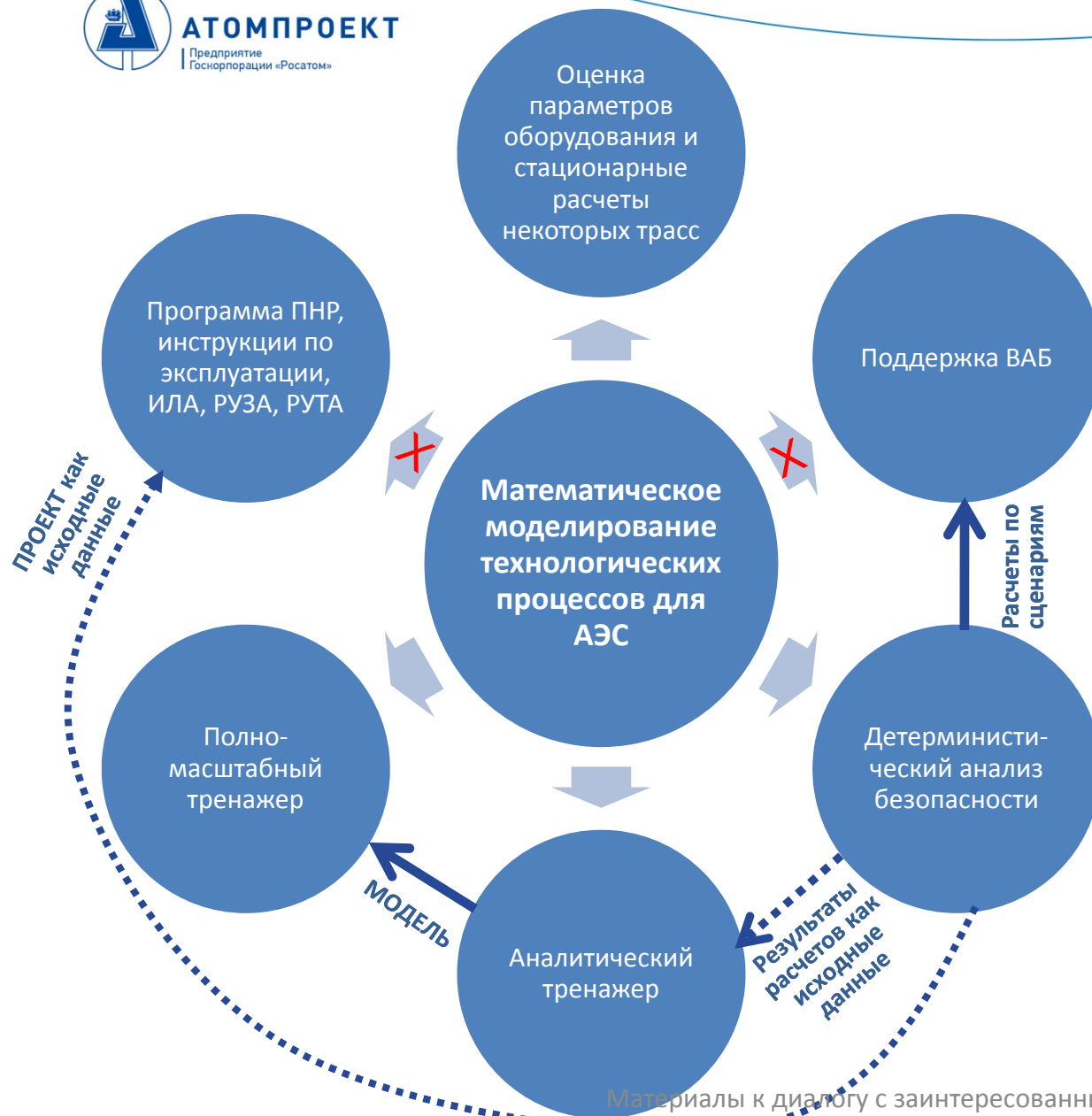
Применение суперкомпьютерных технологий



Верификация проектных решений на Виртуальном энергоблоке (ВЭБ)

Инновационное проектирование





Проблемы:

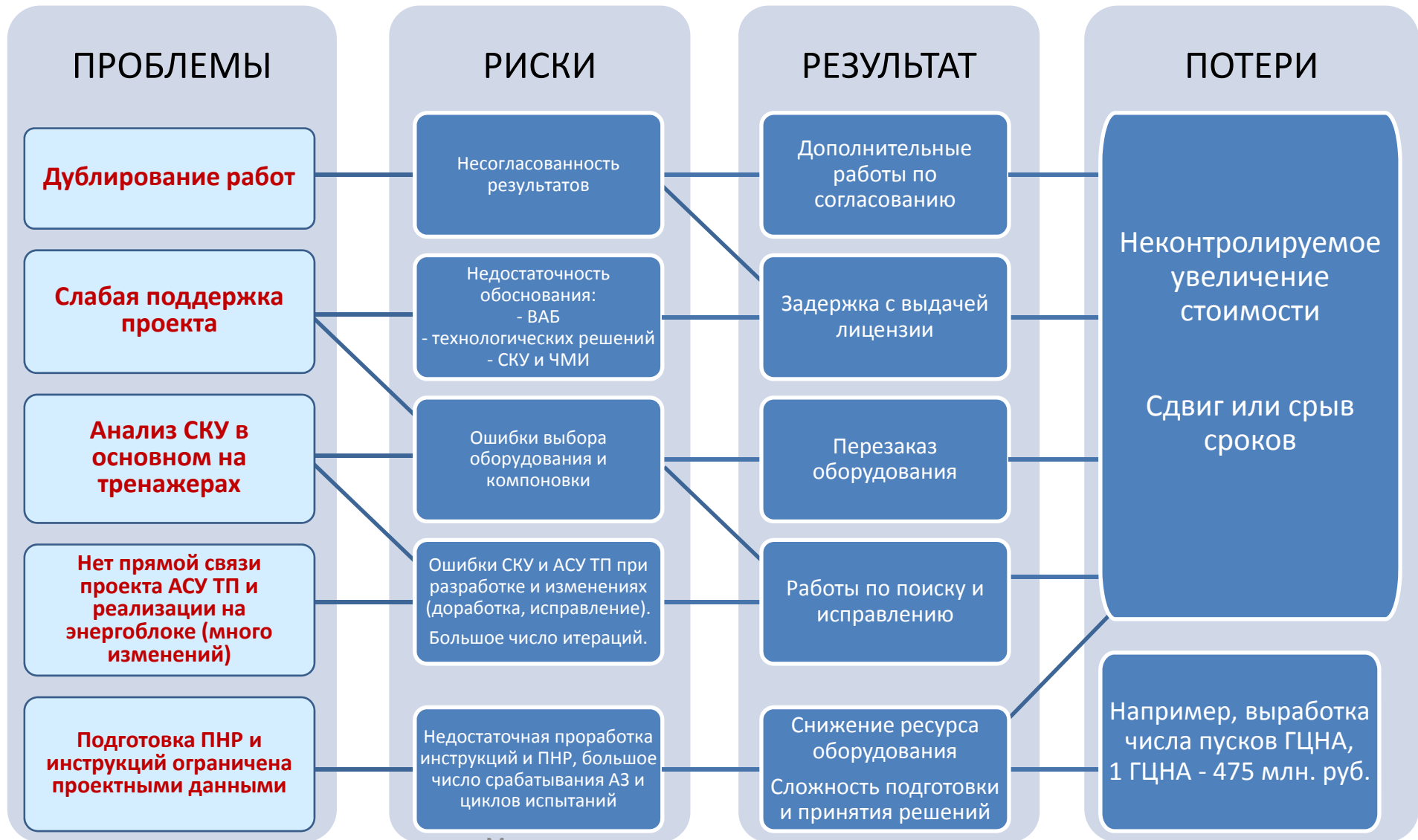
•Дублирование работ

•Слабая поддержка проекта

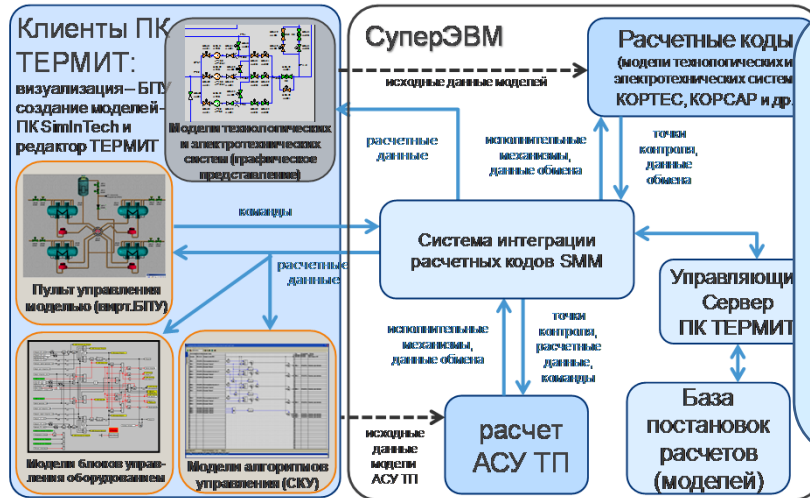
•Анализ СКУ в основном на тренажерах

•Нет связи проекта АСУ ТП и СКУ (задания на автоматизацию) и реализации на энергоблоке

•Подготовка ПНР и инструкций ограничена проектными данными



Материалы к диалогу с заинтересованными сторонами, актуальны на 16 февраля 2016 г.



Программно-технический комплекс «Виртуальный энергоблок АЭС» (ПТК «ВЭБ») – взаимосвязанный набор программных средств и расчетных кодов, который позволяет проводить связанное мультифизичное моделирование процессов в системах и оборудовании энергоблока (теплогидравлика, нейтронная физика, электрика, СКУ и АСУ ТП)

Виртуальный энергоблок (ВЭБ) АЭС – комплексная расчетная модель (для верификации проектов АЭС)



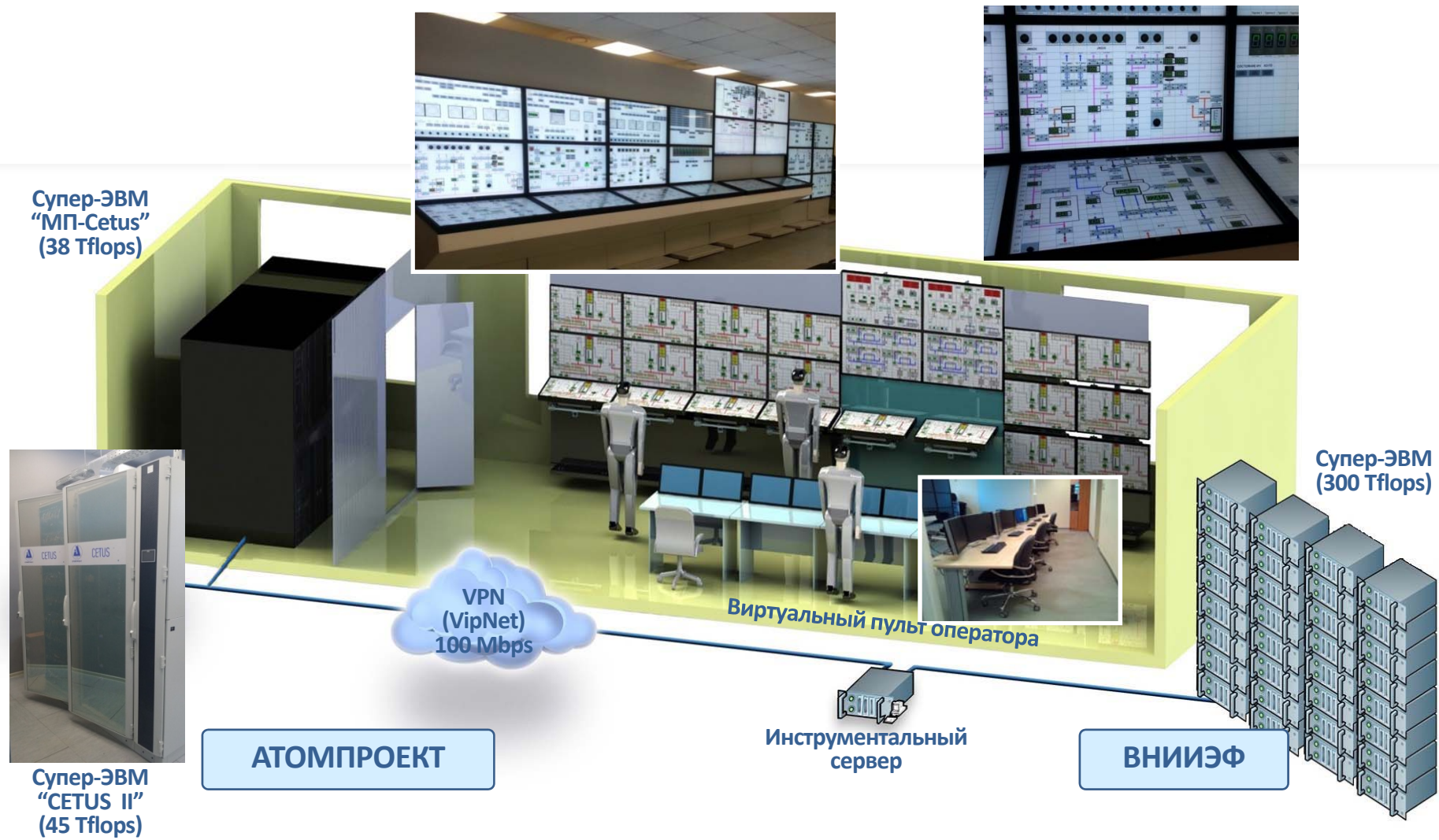


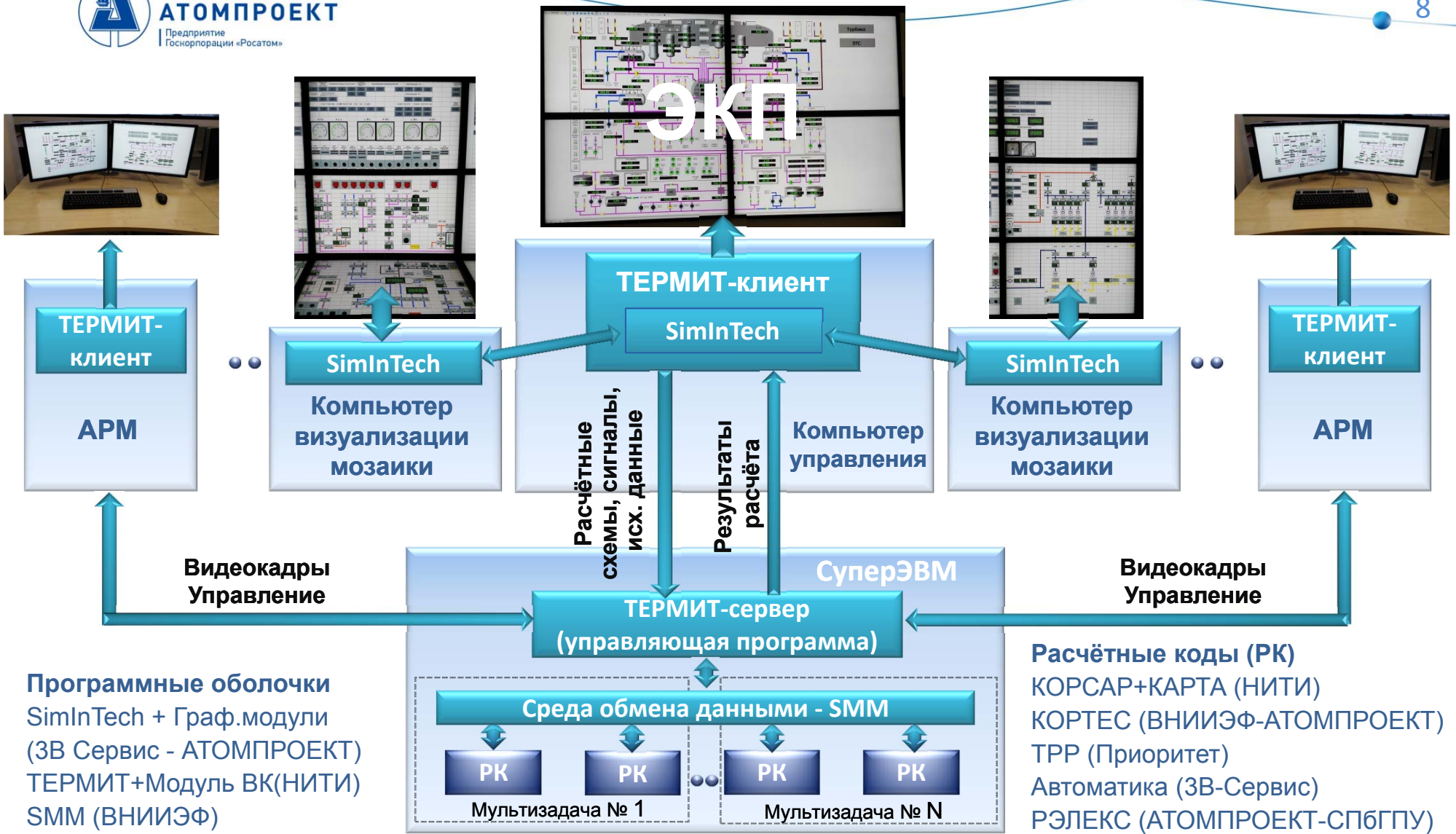
Актуальность ПТК «ВЭБ» для АЭС:

- Выполнение новых требований к обоснованию проектов АЭС:
 - Обеспечение выполнения **европейских требований EUR(D) и требований зарубежных заказчиков** в части сопровождения проекта симулятором.
 - Новое **качество моделирования** за счёт моделей и программ нового поколения.
 - Устранение несоответствий **современным требованиям** в проектном обосновании АЭС.
- Моделирование в рамках **модернизации** и создания **концептуальных** проектов АЭС.
- Поддержка и сокращение сроков ввода в эксплуатацию АЭС за счет сокращения сроков и оптимизации пуско-наладочных испытаний (четкие критерии испытаний).
- Рекомендации аудита TÜV

Решаемые задачи:

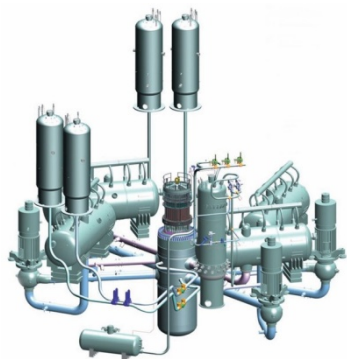
- Верификация проектных решений: проведение комплексного моделирования пусковых, переходных и энергетических режимов работы энергоблока с целью **обоснования технических и технологических решений** по основным и вспомогательным системам АЭС и системам управления, в том числе на этапе проектирования.
- Проверка **функций оператора** и обоснование **ЧМИ** на виртуальном БПУ.
- Моделирование сложных комплексных сценариев развития **аварийных ситуаций** с целью определения мероприятий для их предотвращения или локализации.
- Моделирование пусконаладочных испытаний при вводе энергоблока в эксплуатацию, в том числе и для проверки проекта **пусконаладочных работ**



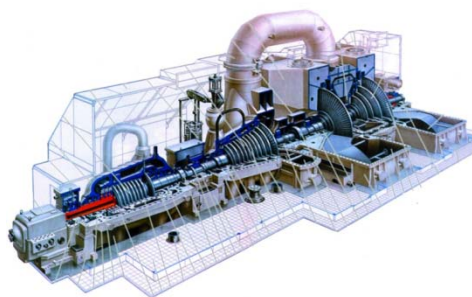


Программные оболочки
 SimInTech + Граф.модули
 (ЗВ Сервис - АТОМПРОЕКТ)
 ТЕРМИТ+Модуль ВК(НИТИ)
 SMM (ВНИИЭФ)

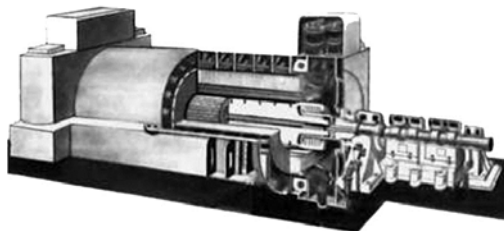
Виртуальный энергоблок ЛАЭС-2. Актуальное состояние.



JAA, JDH, JEA, JEB, JEC, JEF, JEG, JKA, JMN, JNA, JNB, JND, JNG, JNK, KAA, KAB, KBA, KBB, KBC, KBE, KTP

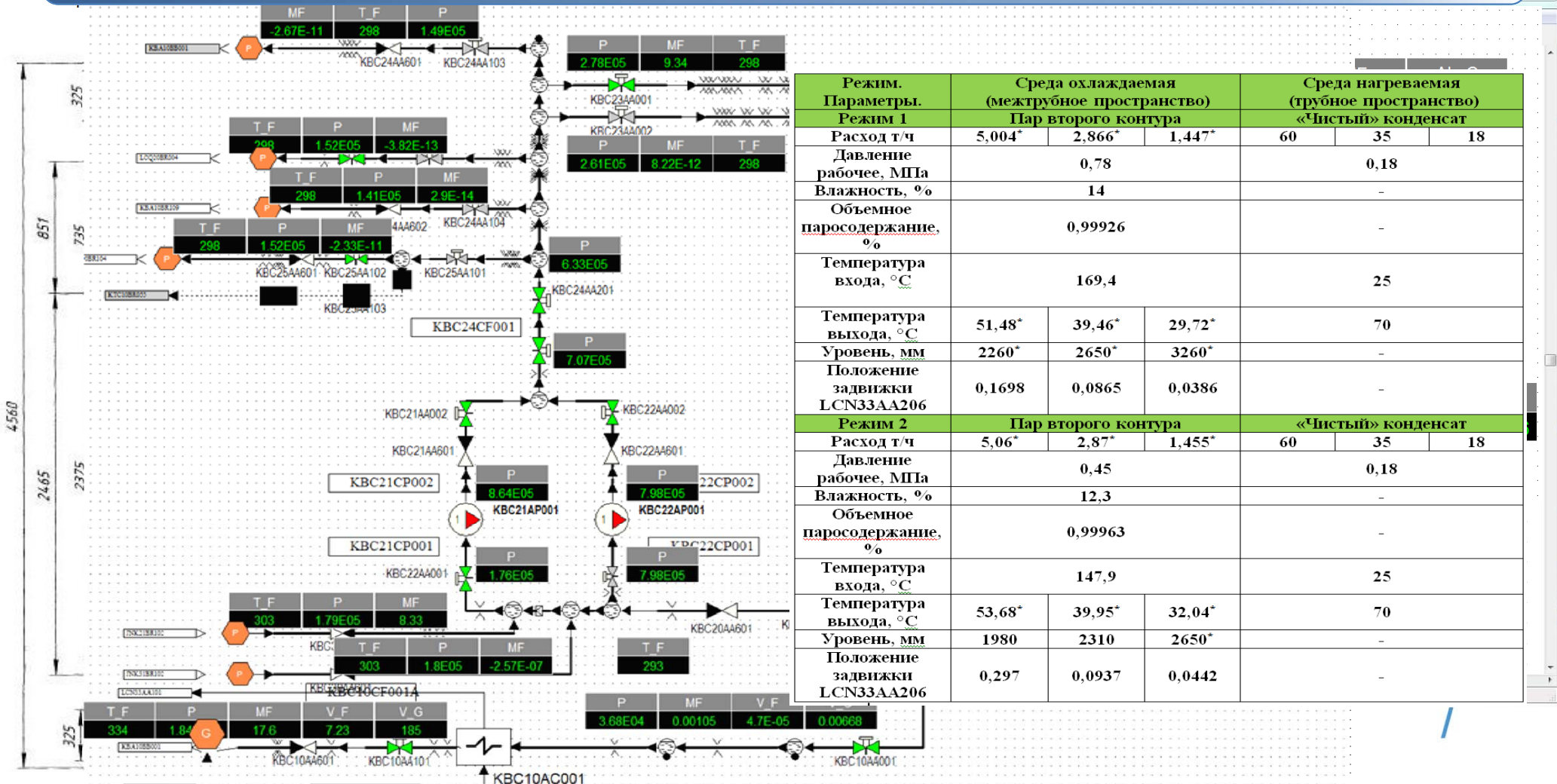


LAA, LAB, LAC, LAD, LAH, LAJ, LAR, LAS, LBA, LBB, LBG, LBJ, LBQ, LBS, LCA, LCB, LCC, LCH, LCJ, LCS, LCT, LCU, MAA, MAC, MAG, MAJ, MAN, MAX, MV



BAA, BAC, BAT, BBA, BBB, BBC, BBD, BBT, BCE, BCF, BCT, BDA, BDC, BDS, BEA, BEB, BEC, BED, BF, BK, BMT, BN, BS, BRU, BT, BV, BW, MKA, XKA

Инженерный (локальный) симулятор технологии

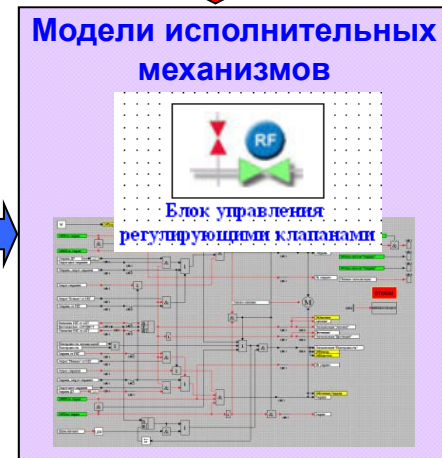
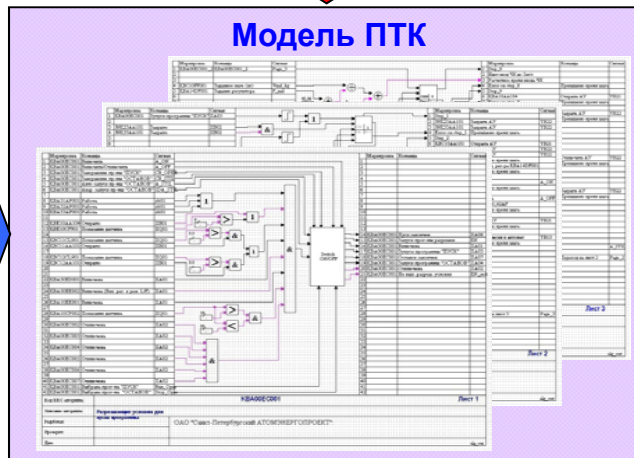


Режим. Параметры.	Среда охлаждаемая (межтрубное пространство)			Среда нагреваемая (трубное пространство)		
	«Чистый» конденсат					
Режим 1	Пар второго контура					
Расход т/ч	5,004*	2,866*	1,447*	60	35	18
Давление рабочее, МПа	0,78			0,18		
Влажность, %	14			-		
Объемное паросодержание, %	0,99926			-		
Температура входа, °C	169,4			25		
Температура выхода, °C	51,48*	39,46*	29,72*	70		
Уровень, мм	2260*	2650*	3260*	-		
Положение задвижки LCN33AA206	0,1698	0,0865	0,0386	-		
Режим 2	Пар второго контура			«Чистый» конденсат		
Расход т/ч	5,06*	2,87*	1,455*	60	35	18
Давление рабочее, МПа	0,45			0,18		
Влажность, %	12,3			-		
Объемное паросодержание, %	0,99963			-		
Температура входа, °C	147,9			25		
Температура выхода, °C	53,68*	39,95*	32,04*	70		
Уровень, мм	1980	2310	2650*	-		
Положение задвижки LCN33AA206	0,297	0,0937	0,0442	-		

сторонами, актуальны на 16 февраля 2016 г.

Технология отработки алгоритмов управления энергоблока АЭС

Оборудование энергоблока



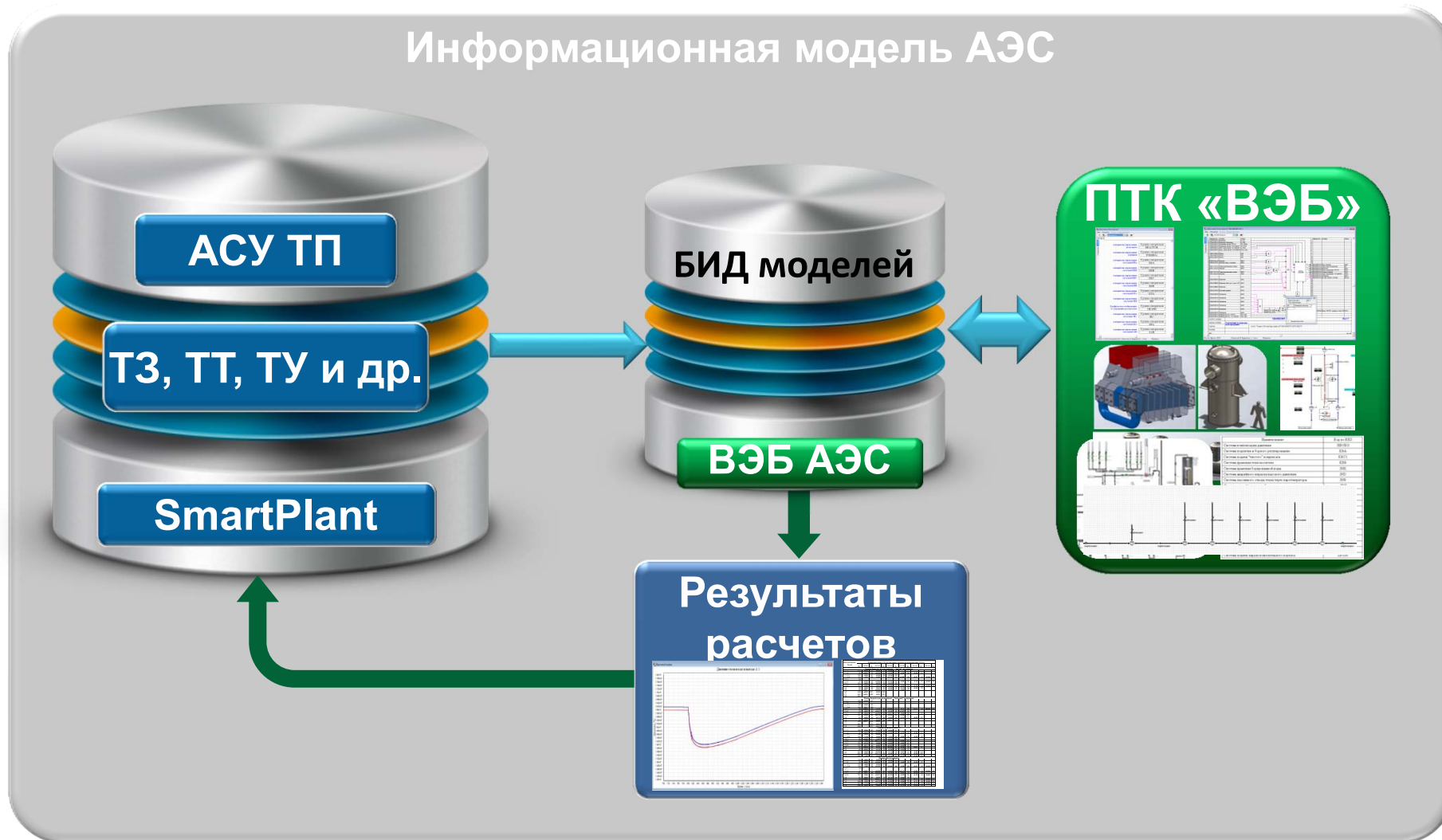
Материалы к диалогу с заинтересованными сторонами, актуальны на 16 февраля 2016 г.



От ПТК «ВЭБ» к ВЭБ АЭС



Информационная модель АЭС



Симуляторы на базе ПТК «ВЭБ»



Аналитический тренажер:

- **Исходные данные для ПМТ**
- **Отработка ПНР**
- **Поддержка эксплуатации**



Эффекты от использования ВЭБ на этапах ЖЦ АЭС

Проектирование

- Устранение несоответствий в проектах оборудования, технологических систем, электротехнических систем и системах контроля и управления.
- Детальная исследовательская модель для **проверки вариантов технических решений и оптимизации** использования систем и оборудования АЭС (улучшение т/э показателей), в том числе ЧМИ.
- Обеспечение соответствия **рекомендациям МАГАТЭ, требованиям EUR(D), заказчика и зарубежных регуляторов** в части использования инженерных симуляторов, **поддержка лицензирования**.
- Использование в качестве **исходных данных** для ПМТ.

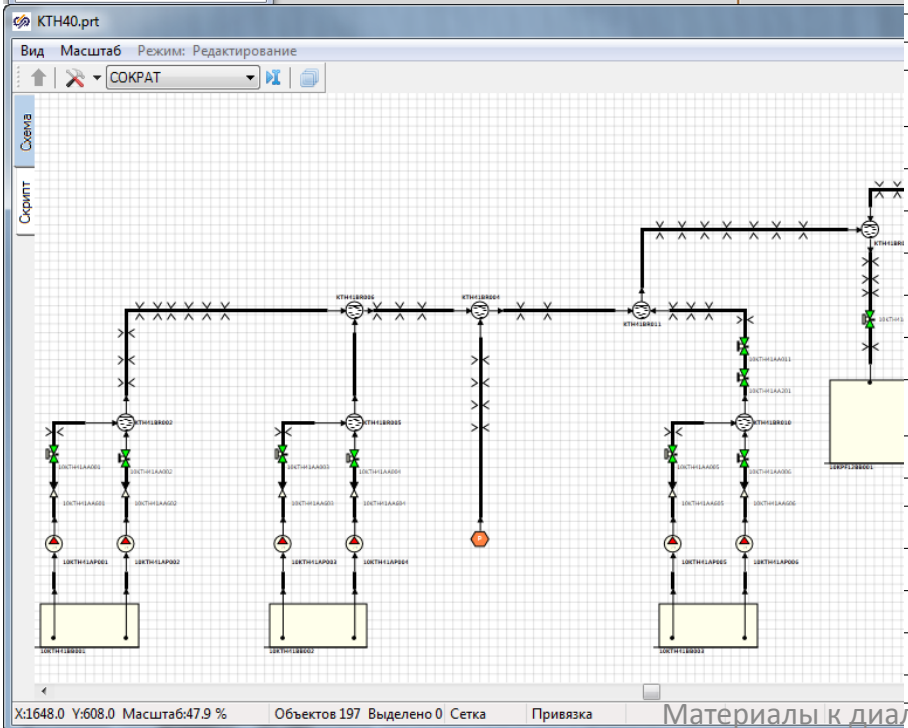
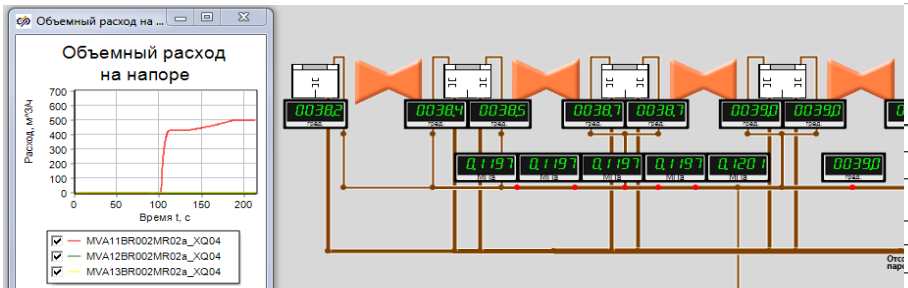
Пуско-наладка

- **Сокращение сроков ввода** в эксплуатацию энергоблоков за счет внедрения эффективного расчетного инструментария, позволяющего ускорить процесс наладки отдельных систем и комплексных испытаний (шайбы, регуляторы).
- Повышение качества и отработка **инструкций по эксплуатации** до начала ПНР.
- **Оптимизация ПНР** на всех последующих блоках серии (после отработки на головном), **сокращение числа циклов нагрузки** оборудования и времени подготовки на реальном энергоблоке.
- Сокращение сроков **принятия решений** и подготовки повторных испытаний.


Эксплуатация

- **Наглядное представление** о процессах в системах АЭС при различных режимах эксплуатации энергоблока с учетом взаимного влияния систем.
- Наглядное представление и **возможность апробации элементов БПУ** до создания полномасштабного тренажера, в том числе возможности обучения.
- Поиск и **анализ нарушений** (в технологической части), сокращение сроков принятия решений.
- Определение потенциального **эффекта от модернизации** систем энергоблока, оценка безопасности планируемых модернизаций.

ВЭБ ЛАЭС-2 для ПНР. Совместные работы с АО «Атомтехэнерго»



№ п/п	Наименование системы	KKS код(ы)	Расчетный код	Состояние (% вып.)			Сроки (план/)	
				Н.ск.	АСУ ТП	Инт.	Схема	АСУ ТП
28	Секция питания общестандционной вагонной 6 кВ	BCE		0	0	0	3кв 2015	4кв 2015
29	Секция питания общестандционной матушки 6 кВ	BCF		0	0	0	3кв 2015	4кв 2015
69	Система очистки воды топливного бассейна и баков хранения борированной воды	FAL		0	-	-	4кв 2015	нет
75	Система ионообменной очистки	GCF						
76	Система регенерации и промывки ионообменных фильтров	GCP					3кв 2015	3кв 2015
77	Система отвода промывочной воды и нейтрализации	GCR					3кв 2015	3кв 2015
147	Система азота высокого давления	KKJ		0	0	0	3кв 2015	4кв 2015
148	Система азота низкого давления	KKK		0	0	0	3кв 2015	4кв 2015
149	Система дренажа оборудования здания реактора	KTA		0	0	0	4кв 2015	4кв 2015
166	Трубопроводы вспомогательной питательной воды	LAN		20	80	0		
168	Система аварийной питательной воды	LAR		80				
169	Насосы системы аварийной питательной воды	LAS		80				
183	Система впуска основного конденсата	LCE						
189	Система продувки парогенераторов	LCQ						
192	Система подпиточной воды	LCU		100				
194	Система подпитки конденсата на управление клапанами обратными солевыми на отборах турбины	LCX						
196	Система обезжелезивания и обессоливания конденсата турбины	LDI		0				
199	Система регенерации и промывки фильтров очистки конденсата	LDP						
221	Бак запаса масла системы смазки турбогенератора	MVA		100				
222	Масляный насос системы смазки турбогенератора	MVB		100				
224	Трубопроводы системы смазки турбогенератора	MVJ		100				
241	Система трубопроводов охлаждающей воды ответственных потребителей	PEB		0				
258	Система водоснабжения здания управления	QXS		0				
260	Система специализированной вспомогательной воды	WAT						



АО «АТОМТЕХЭНЕРГО»

ПРИКАЗ

№ 400-17

г. Мытищи

«05.08» 2015 г.

О выполнении работ по моделированию систем энергоблока №1 ЛАЭС-2 в рамках создания виртуального энергоблока АЭС

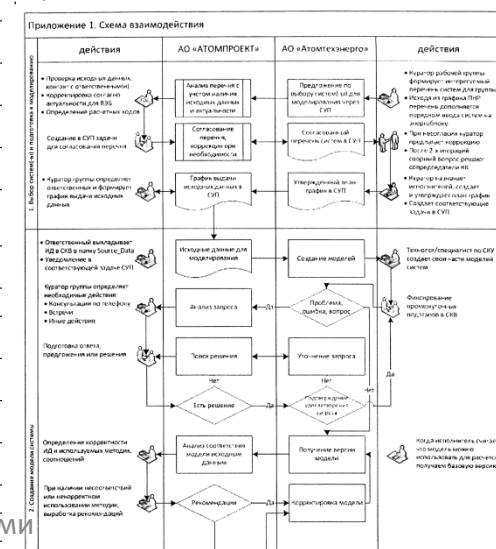
Для организации, планирования, качественного и своевременного выполнения работ по моделированию систем ЛАЭС-2 виртуального энергоблока (ВЭБ) АЭС

ПРИКАЗЫВАЮ:

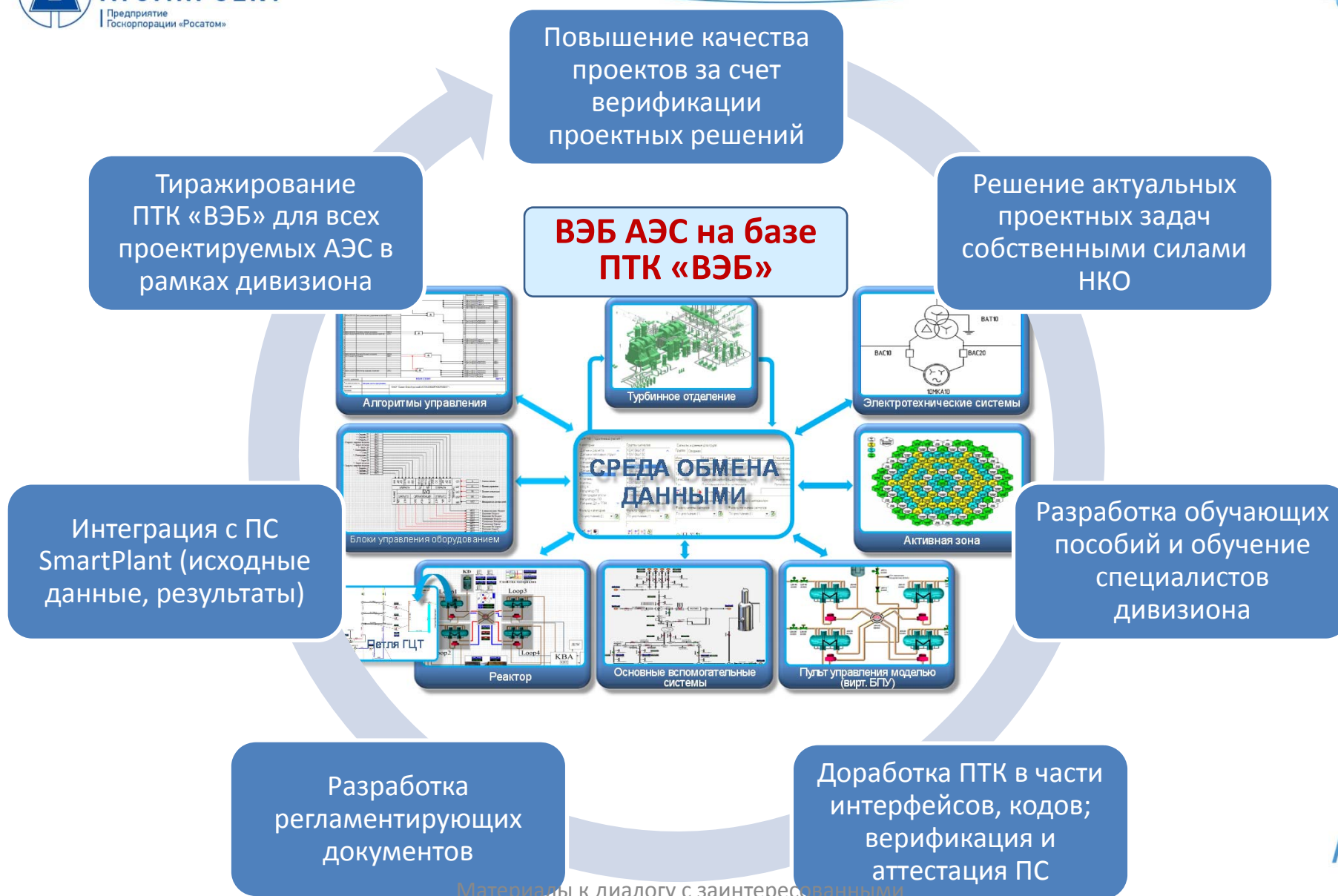
1. Назначить ответственных за выполнение работ по моделированию систем энергоблока №1 ЛАЭС-2 в соответствии с Рамочным соглашением № 156х/13 от 29.03.2013г. о сотрудничестве между АО «АТОМПРОЕКТ» и

Приказом №1
№ 468-17
от 05.08.2015

Матрица выполнения работ по моделированию систем энергоблока №1 ЛАЭС-2 на 2 полугодие 2015 года



Срок разработки модели системы	Срок подготовки отчета по выполнению ПНР
30.05.2015	
30.08.2015	-
30.09.2015	-
30.10.2015	-
30.11.2015	-
30.09.2015	-
30.08.2015	-
30.09.2015	-
30.08.2015	-
30.11.2015	-
30.11.2015	-



Суперкомпьютерные технологии

Решение производственных задач с помощью высокопроизводительных вычислений

Аппаратно-системная база

Гидродинамика и тепло-массоперенос

Прочность

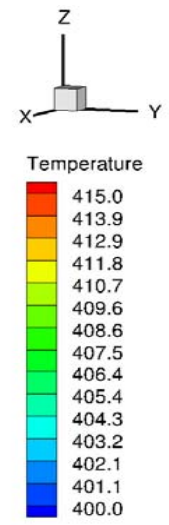
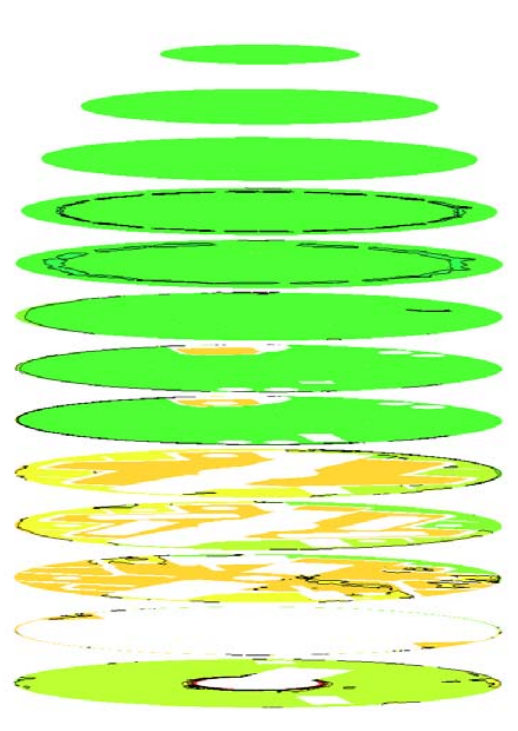
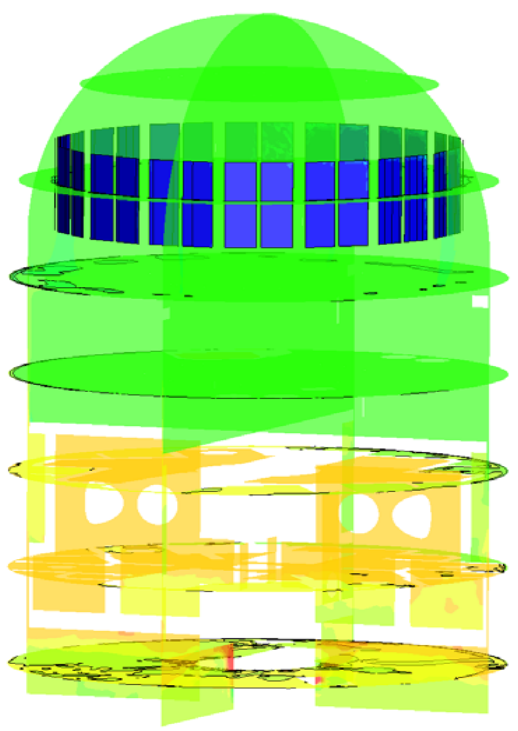
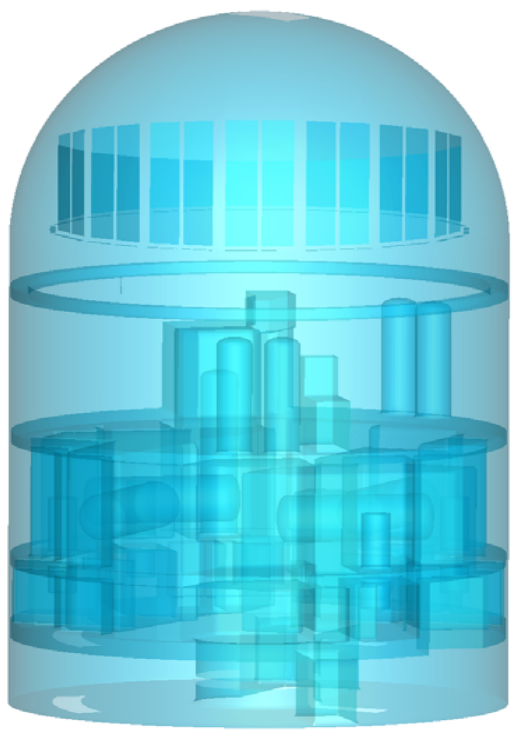
Ядерная и радиационная безопасность

Связанные расчеты и др.

2 СуперЭВМ
Суммарная производительность 100 TFlops
- Развитие собственной базы

Удаленный доступ к ресурсам ВЦКП ВНИИЭФ

Обоснование СПОТ 30 АЭС-2006 (Моделирование процессов теплопереноса в парогазовой среде натурального контейнента)

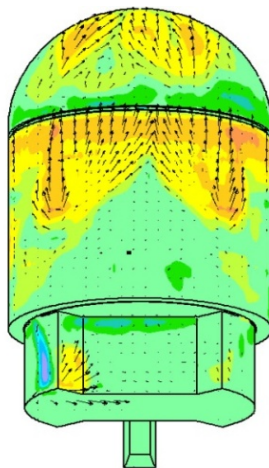


Моделирование процессов теплопереноса внутри защитной оболочки на внекорпусной стадии тяжелой аварии (размер сетки - 4.1 млн. ячеек)

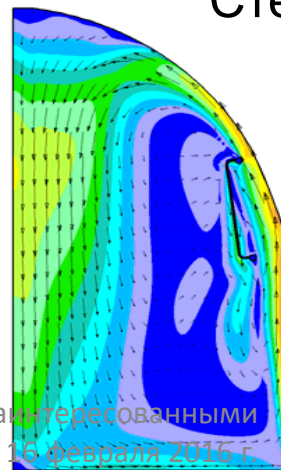
Валидация CFD-кодов для обоснования СПОТ 30

<p>Стенд СМК</p>	<p>Моделирование процессов теплопереноса при естественной конвекции. Во всех расчетах использовалась k-ε модель турбулентности. Размер задачи ~2000000 ячеек Длительность расчета 1 месяц на 160 ядрах</p>
<p>Стенд КМС</p>	<p>Моделирование процессов тепломассопереноса в парогазовой смеси в защитной оболочке при запроектной аварии. Размер задачи ~1200000 ячеек Длительность расчета 1 месяц на 160 ядрах</p>
<p>Стенд СПОТ 30 (ОАО ОКБМ Африкантов)</p>	<p>Моделирование работы теплообменника-конденсатора, помещенного в цилиндрический сосуд с источником пара внутри сосуда. Размер задачи ~ 700000 ячеек Длительность расчета 1 месяц на 160 ядрах</p>

Стенд КМС

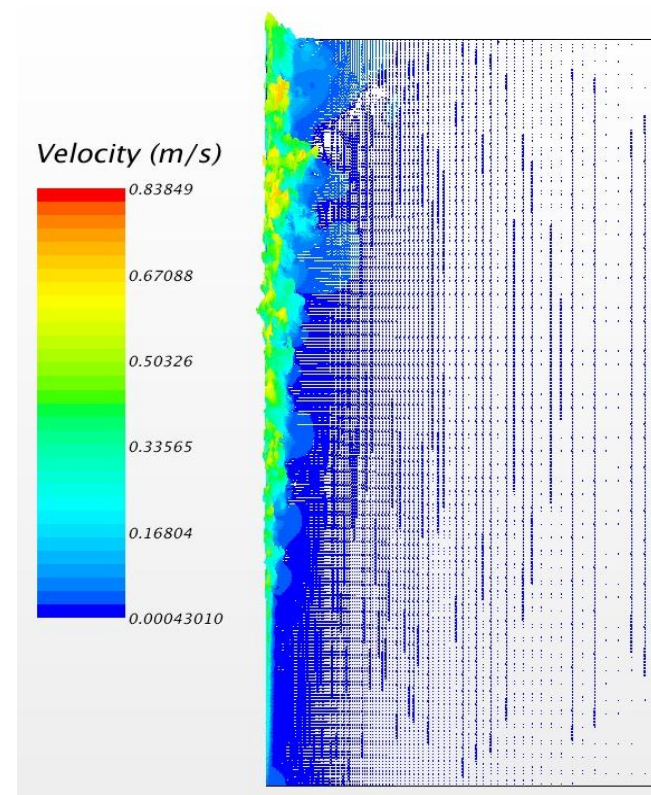
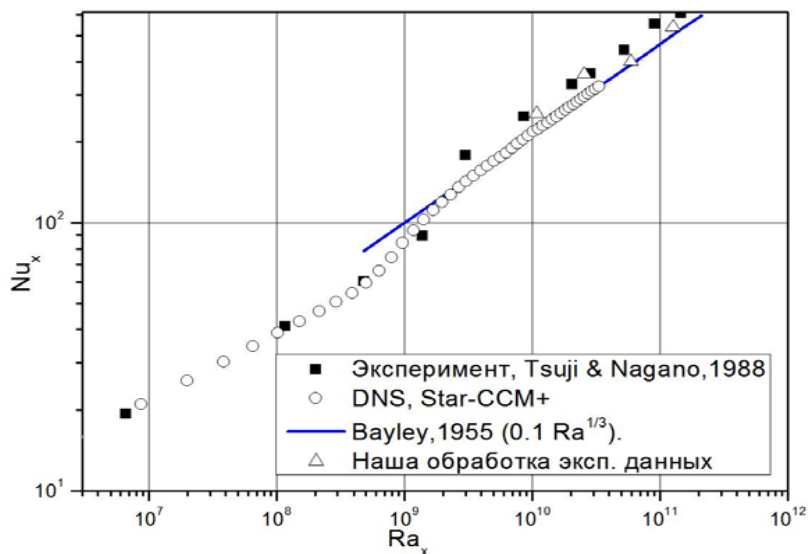


Стенд СМК



Сравнение результатов расчетов методом DNS с экспериментами

Расчеты теплоотдачи от теплообменных труб при свободноконвективном течении методом прямого численного моделирования (DNS).
100 миллионов ячеек.
Длительность расчета 5 дней на 500 ядрах.



StarCCM+

Моделирование системы пассивного отвода тепла от бассейна выдержки АЭС БН-1200 (обоснование отсутствия разверки температуры воды по глубине пучка ТВС)

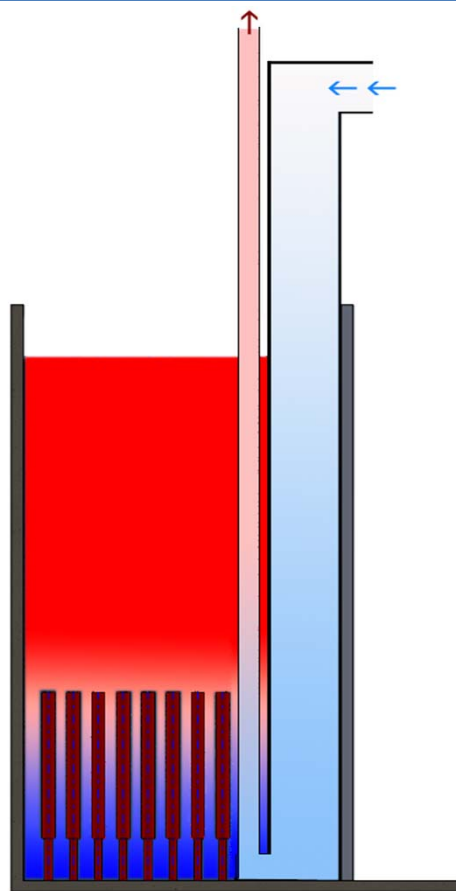
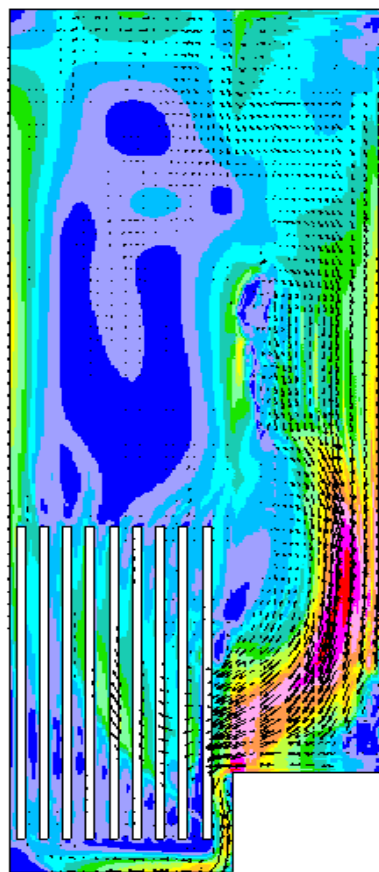
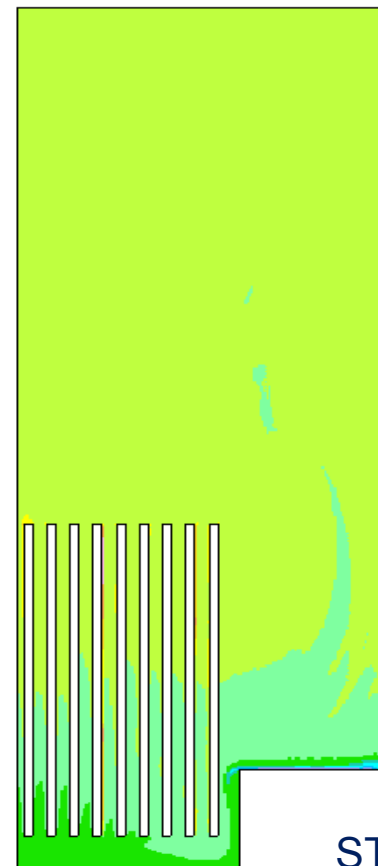


Схема СПОТ БВ



Velocity Magnitude
m/s
LOCAL MX= 0.6525E-01
LOCAL MN= 0.1635E-04
PRESENTATION GRID

0.6525E-01
0.6059E-01
0.5593E-01
0.5127E-01
0.4661E-01
0.4195E-01
0.3729E-01
0.3263E-01
0.2797E-01
0.2331E-01
0.1865E-01
0.1400E-01
0.9335E-02
0.4676E-02
0.1635E-04



Temperature
ABSOLUTE
K
LOCAL MX= 338.6
LOCAL MN= 334.8

338.6
338.3
338.1
337.8
337.5
337.2
337.0
336.7
336.4
336.1
335.9
335.6
335.3
335.0
334.8

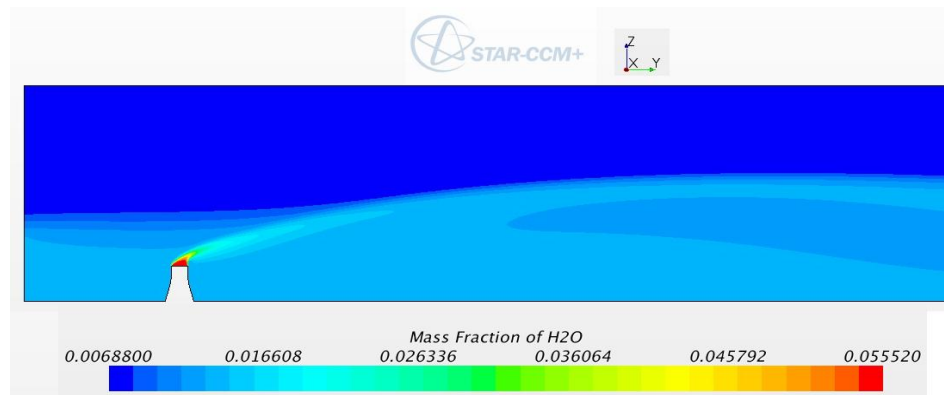
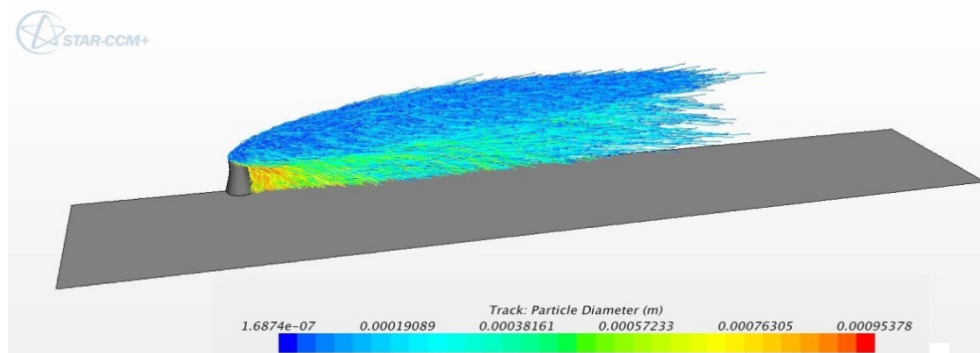
STAR-CD

Сопряженный расчет перемешивания воды в БВ и течения воздуха внутри труб теплообменника

Материалы к диалогу с заинтересованными сторонами, актуальны на 16 февраля 2018 г.

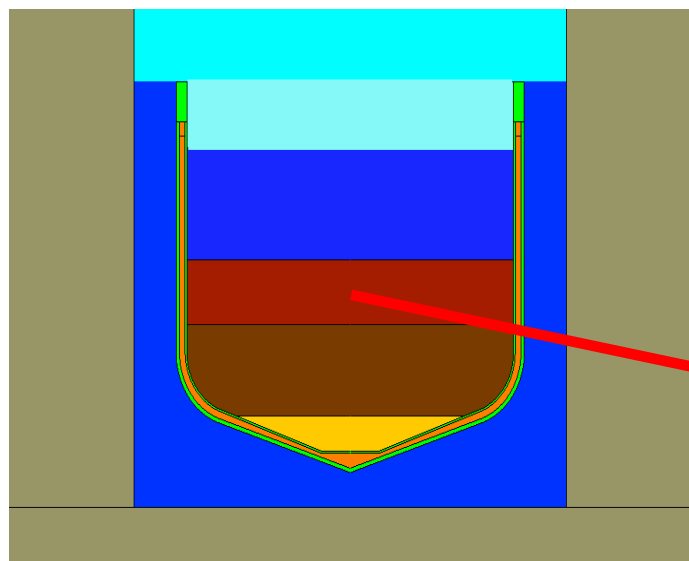
Расчеты башенных градирен CFD-кодами

Расчет распространения капель уноса из градирни в лагранжевом приближении двухфазных течений с использованием RANS и LES турбулентных моделей.
10 миллионов ячеек.
Длительность расчета около 24 часов на 100 ядрах.

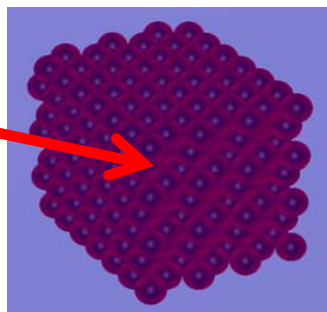


StarCCM+

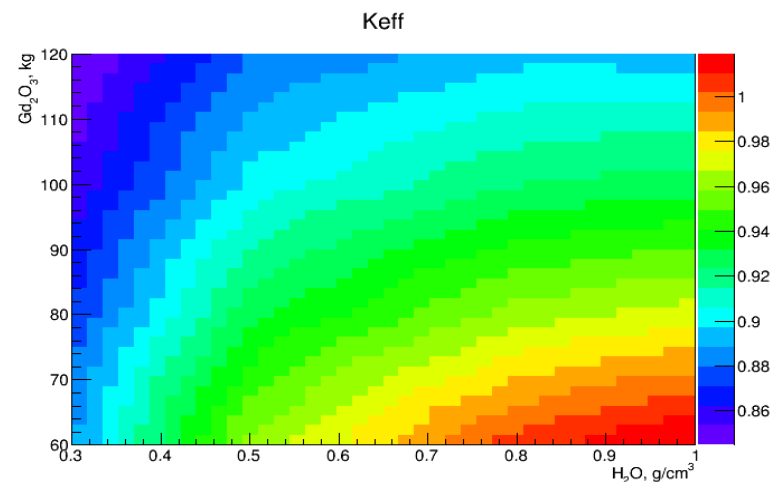
Развитие прецизионной программы TDMCC, выполненное по нашему запросу, позволило корректно моделировать перенос нейтронов в нерегулярных гетерогенных средах



На финальной стадии развития тяжелой аварии, в УЛР формируется нерегулярная гетерогенная структура из остывшего кориума и воды. Полноценный расчет критичности такой системы стал возможен только после модификации программы TDMCC



Модель верифицировалась путем расчетов похожих гетерогенных структур, состоящих из конечного числа элементов

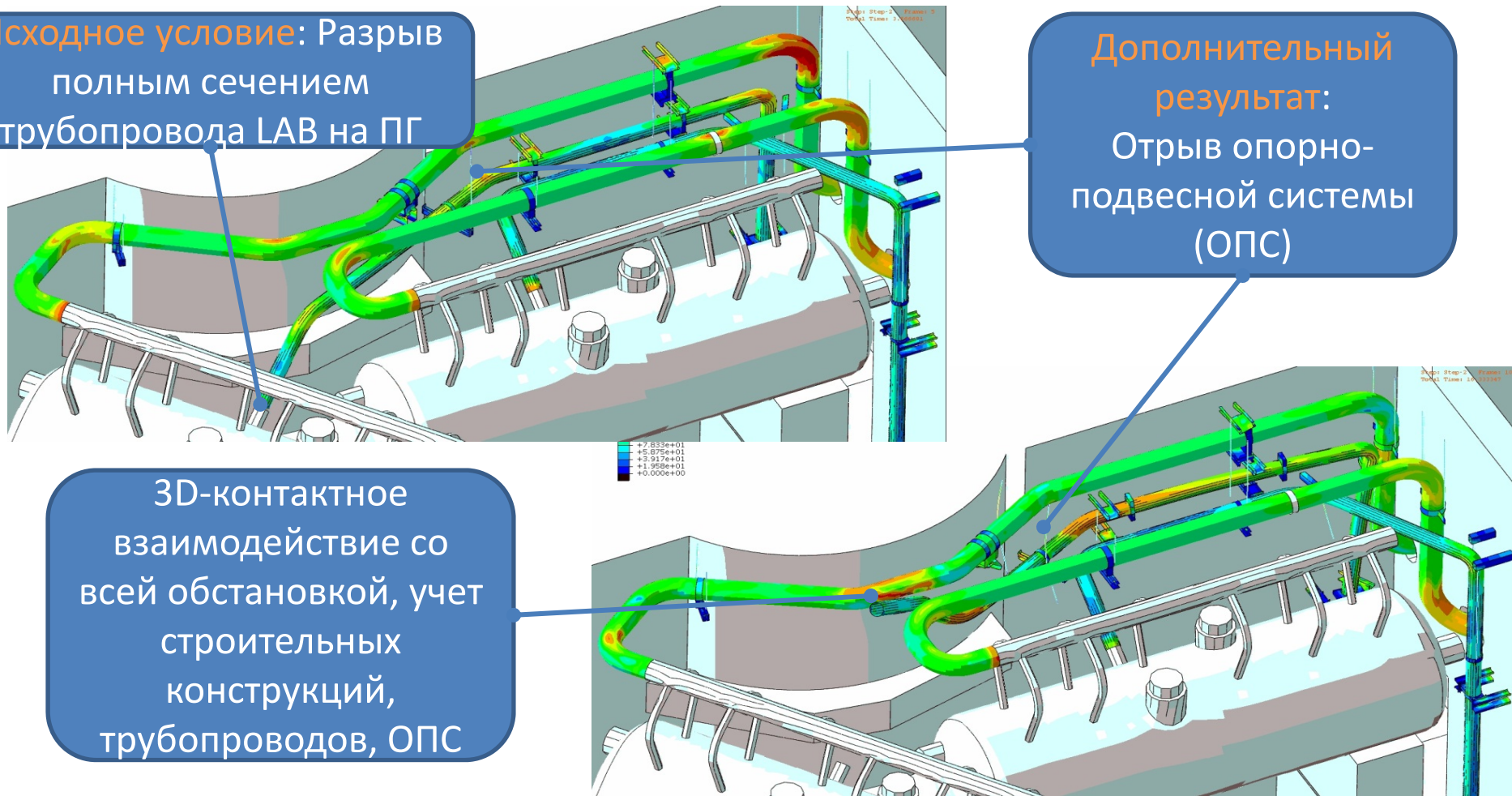


Прочностные расчеты

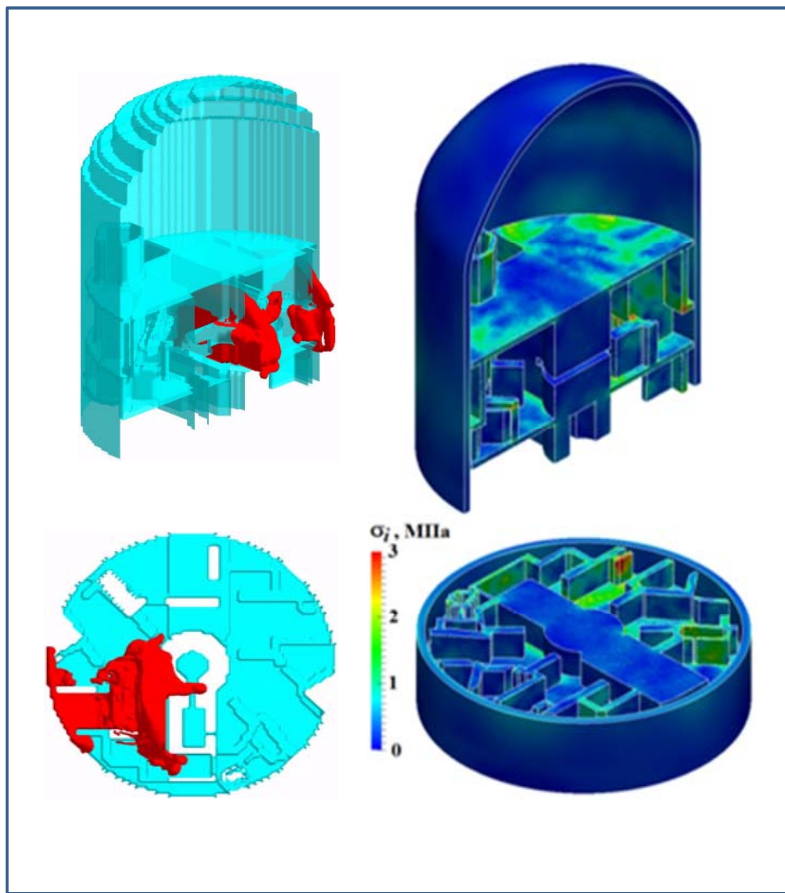
Исходное условие: Разрыв полным сечением трубопровода LAV на ПГ

Дополнительный результат: Отрыв опорно-подвесной системы (ОПС)

3D-контактное взаимодействие со всей обстановкой, учет строительных конструкций, трубопроводов, ОПС



Связанные расчеты



Модель турбулентного горения и детонации многокомпонентной среды.
Определение НДС строительных конструкций.
Суммарная размерность модели:
9,23 млн. ячеек.

Связанная динамическая задача.
Для каждого временного шага результаты расчетов горения передаются в прочностную модель контейнмента

Длительность расчета:
30 часов, 524 ядра.

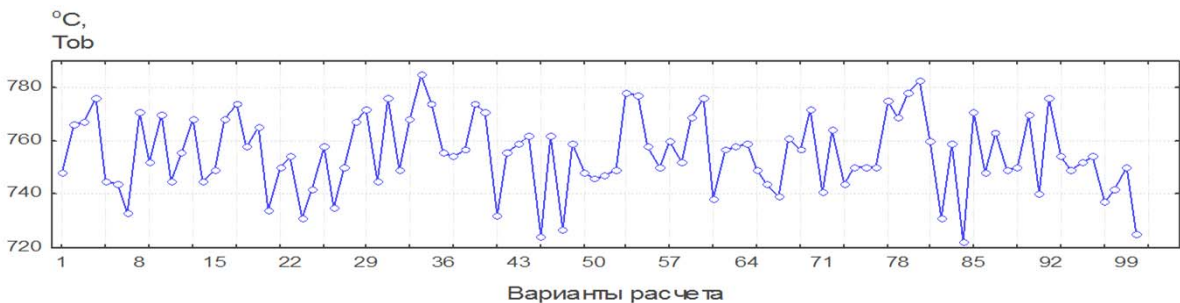
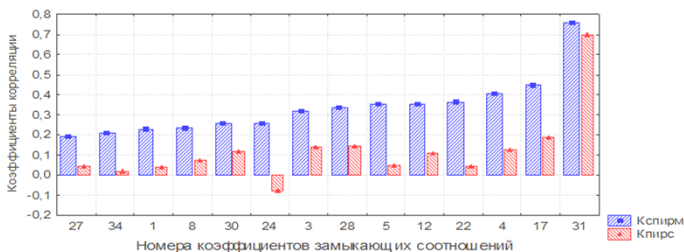
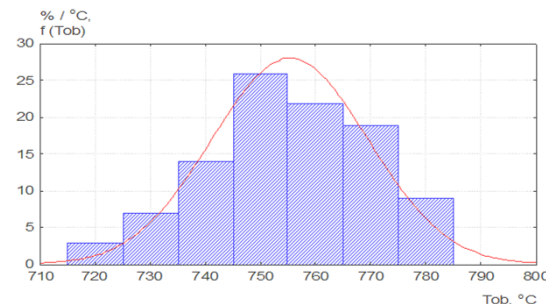
ПО:
ДАНКО+FIRECONE

Вероятностно-статистический анализ неопределенностей и чувствительности

Проведение не менее 100 вариантных расчётов с целью анализа чувствительности и неопределённости

Использование суперЭВМ позволило более широко применять GRS-метод и уменьшить временные затраты в 150 раз

Снижение консерватизма заложенного в проектных решениях, удовлетворение требований Заказчика и регулирующих органов





Результаты внедрения технологий

**Детальное моделирование,
обоснование и четкое понимание
работы систем энергоблока в
различных ситуациях**

**Отказ от излишнего консерватизма
проектных решений**

**Инновационное
проектирование**

**Постепенный отказ от
дорогостоящих экспериментов**

**Конкурентоспособность на
мировом рынке**