



РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

Институт проблем безопасного развития атомной энергетики

RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES

ИБРАЭ

Nuclear Safety Institute

Методические подходы к созданию модели энергоблока АЭС с ВВЭР для реалистического расчётного анализа тяжёлых аварий и обеспечения радиационной безопасности

К.С. Долганов

XVI Международная конференция
«Забабахинские научные чтения»
Снежинск, 1-5 июня 2023 г.

Содержание

- ❑ Область исследования, цели
- ❑ Актуальность, новизна
- ❑ Методические подходы
 - <Практические примеры>
- ❑ Заключение

Область исследования

- ❑ Математическая модель энергоблока
- ❑ АЭС с ВВЭР
- ❑ Тяжелые аварии

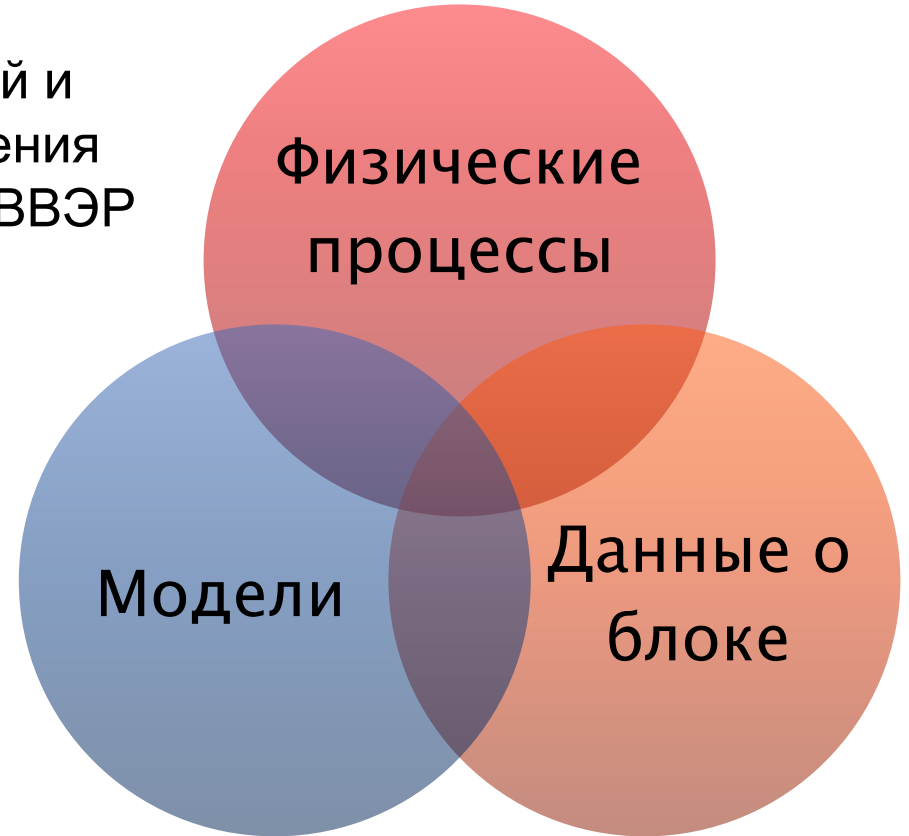
Цель: обоснованное прогнозирование событий и последствий тяжёлых аварий

Математическая модель энергоблока –
формализованное представление данных
о наиболее важных взаимосвязанных структурных
составляющих энергоблока,
возникающих в них физических **процессах и явлениях,**
описывающих эти процессы и явления **моделей,**
в совокупности интегрированных
в **единое валидированное средство** расчётного анализа

Актуальность: создание устойчивой и масштабируемой системы накопления знаний о протекании ТА на АЭС с ВВЭР

Новизна: синтез и адаптация в практической плоскости отдельных результатов, полученных с конца 1990-х годов

Важность: сохранение и развитие знаний, создание и поддержка центров компетенций в отраслевых организациях



1. Что именно моделировать?

Элементы энергоблока, ...

1.содержащие радиоактивные вещества – топливо в а.з. и БВ
2. ...обеспечивающие выполнение основных функций безопасности

Удержание РВ

физические барьеры безопасности

Теплоотвод от топлива

контур теплоносителя,
оборудование и системы безопасности

Подкритичность

системы безопасности

Компоненты,
материалы,
уставки

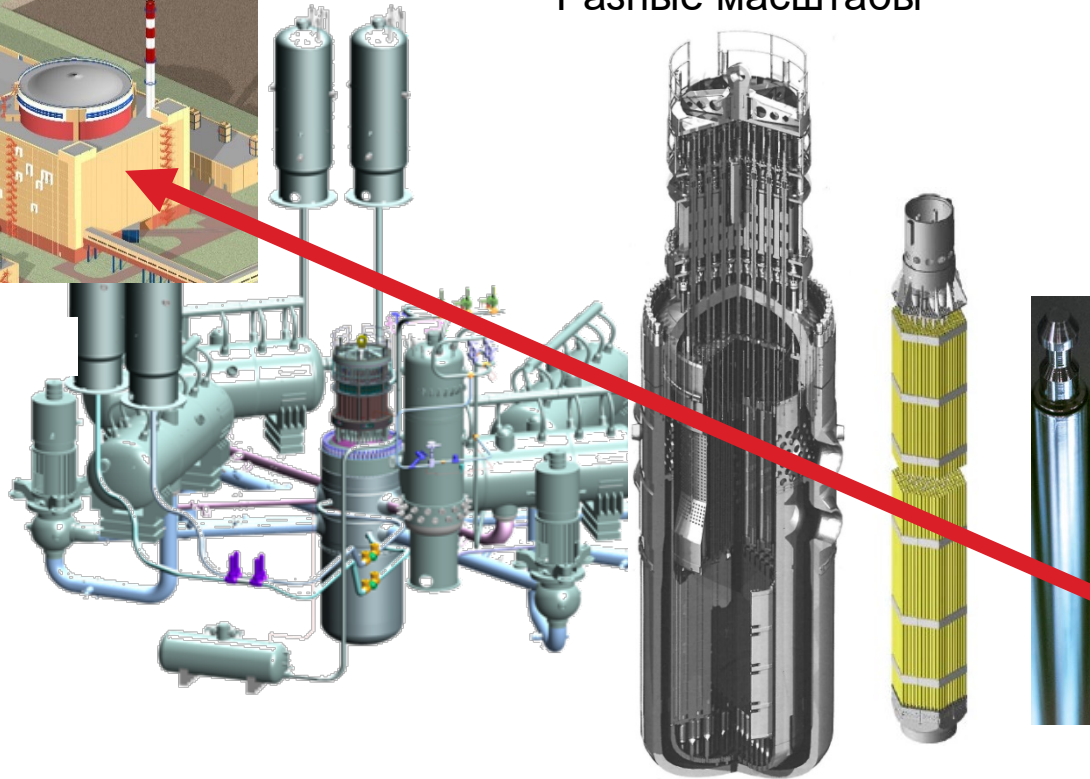
Декомпозиция энергоблока на структурные составляющие с учётом их влияния на протекание и последствия аварии

2. Какие процессы и явления моделировать? (1/2)

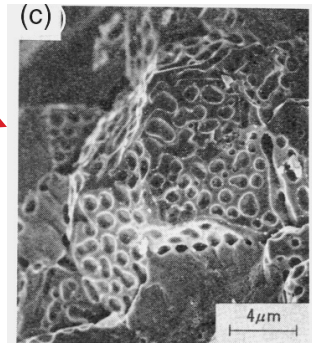
Разные масштабы



$R_{ro} \sim 10$ [M]



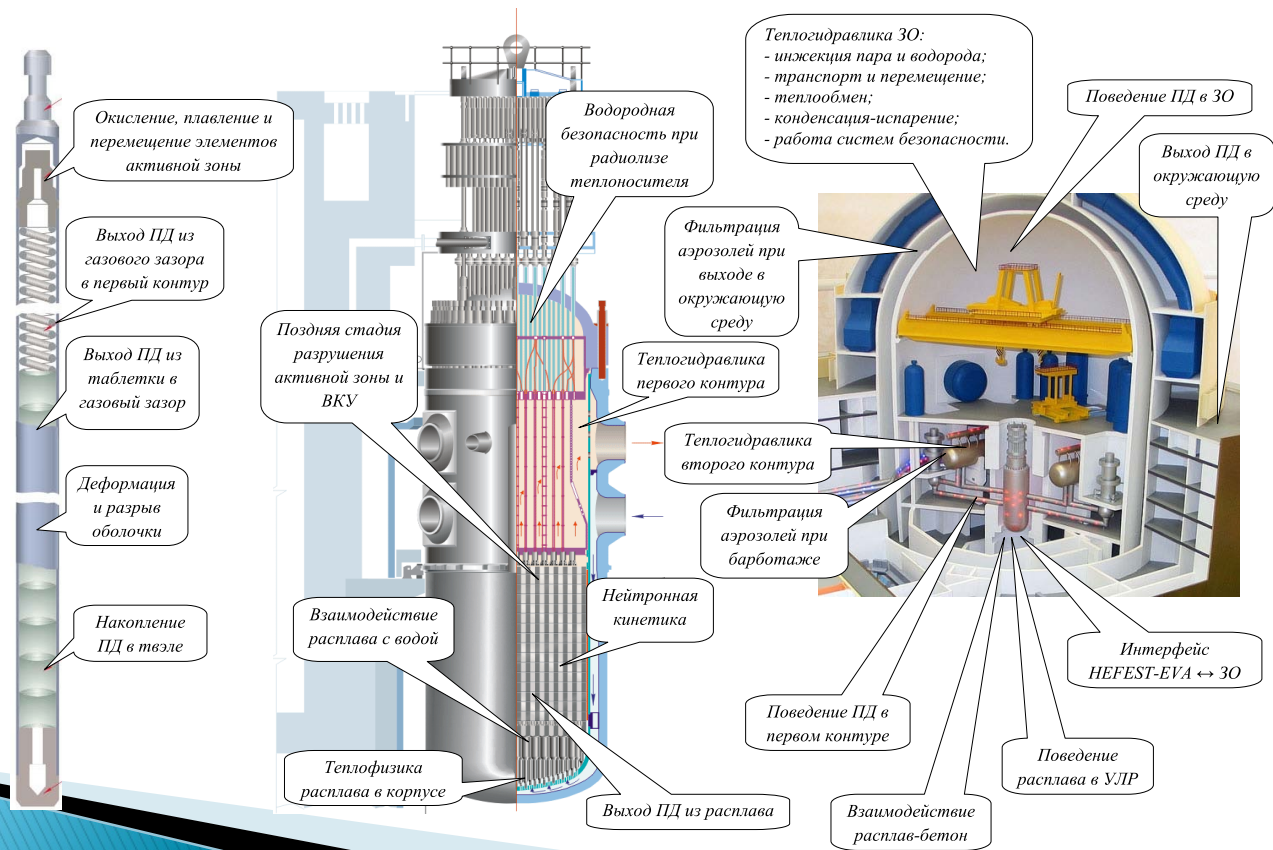
$R_{\text{grain}} \sim 1.e-6 - 1.e-5$ [M]
 $R_{\text{bubble}} \sim 1.e-9 - 1.e-7$ [M]
 $R_{\text{atom}} \sim 1.e-10$ [M]



2. Какие процессы и явления моделировать? (2/3)

Разная физика

Разное характерное время



2. Какие процессы и явления моделировать? (3/3)

Феноменологический анализ ожидаемых условий и состояний

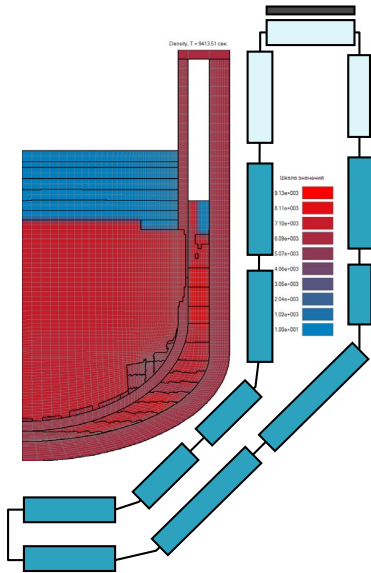
1. Выявление и ранжирование по значимости процессов
2. Перечень и взаимосвязь определяющих (ключевых) процессов

Методики

- PIRT
- Анализ уроков, извлеченных из ранее произошедших аварий на структурно-подобных АЭС

<Phenomena Identification and Ranking Table>

Удержание расплава в корпусе реактора.
Воздействие расплава на стенку корпуса



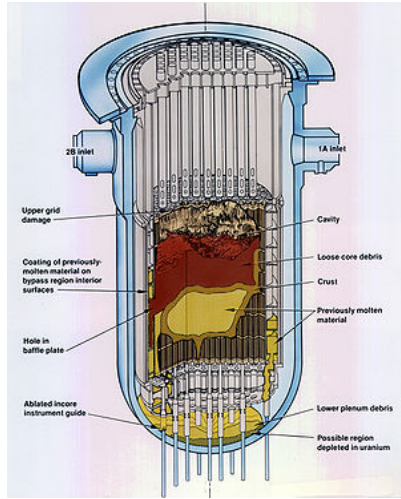
Процесс/явление	Важность для успеха	Степень изученности
Термохимия и конфигурация расплава (нормальное/инверсное расслоение)	B	C
Распределение ПД и ОТВ в расплаве	C	C
Теплофизические свойства многокомпонентного расплава	C	C
Состояние расплава на границе с корпусом	C	M
Состояние расплава на межфазной границе и теплообмен между слоями	C	M
Термохимия корок на границе расплава с корпусом	C	M
Теплоотдача к корпусу от слоёв бассейна расплава и эффект фокусировки	C	C
Воздействие ударной струи расплава	M	B
Химическое взаимодействие оксидного расплава с корпусом: коррозия, обезуглероживание, жидкофазное горение	M/B/M	M

Какие модели нужны?

Какие эксперименты нужны?

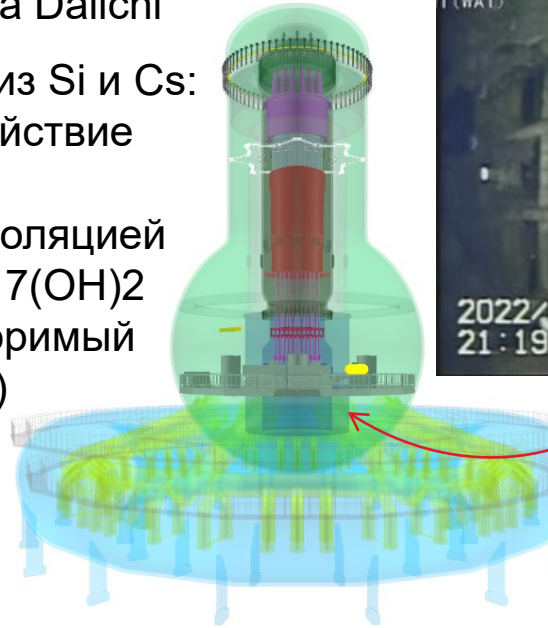
<Учёт уроков аварий>

TMI-2

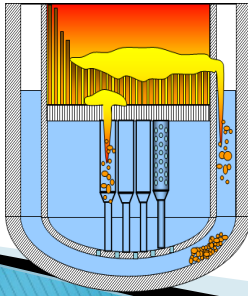


Fukushima Daiichi

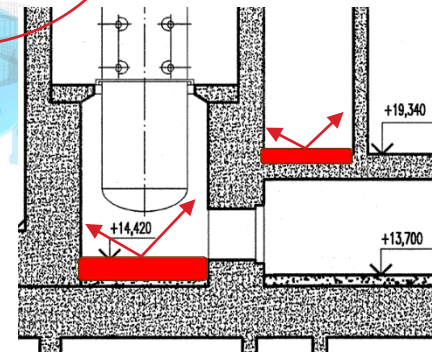
Частицы из Si и Cs:
взаимодействие
паров Cs
с теплоизоляцией
 $\text{Ca}_6\text{Si}_6\text{O}_{17}(\text{OH})_2$
(нерастворимый
 CsAlSiO_4)



ВВЭР: «боковое проплавление»



ВВЭР



https://fdada.info/en/home2/vis_3d-en/unit1_2_3d-en/

https://www.tepco.co.jp/en/news/library/archive-e.html?video_uuid=14952&catid=69631

3. Как именно моделировать <ключевые процессы на основных составляющих энергоблока>?

Интеграция отдельных физмоделей в единый комплекс

Ориентация на модели улучшенной оценки (следствие НП-001-15)

Механистические VS параметрические модели

Насколько возможно, отказ от критериальных моделей (пороговый эффект)

Максимальный учёт современного уровня знаний

Валидация физических моделей и их совокупности => погрешности результирующих параметров

Интерфейсы с внешними программами (CFD, атмосферный перенос)

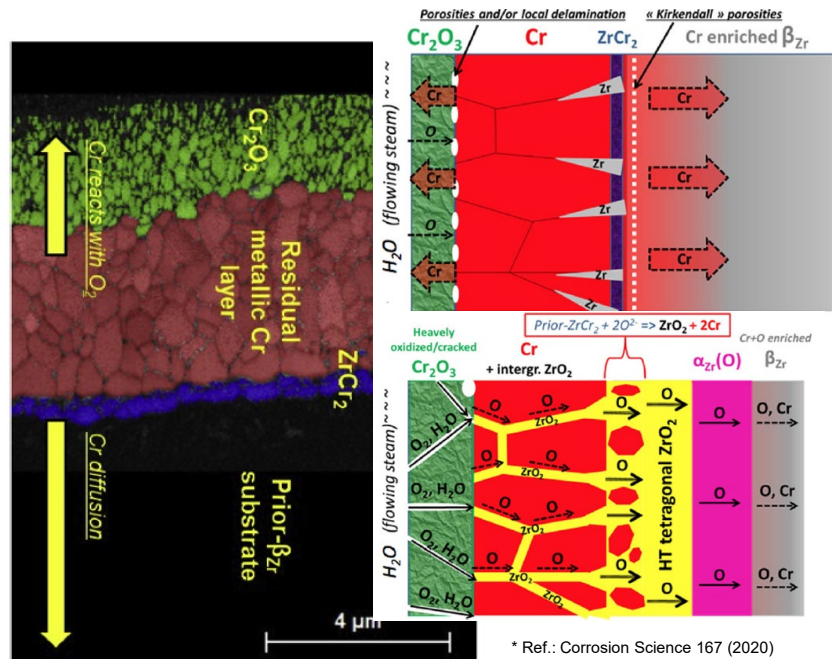
<Механистические модели VS параметрические модели>

$\partial C_j / \partial t = -\partial(f_o^j \cdot r) / (r \cdot \partial r), \quad f_o^j(r,t,T) = F_j + v_j \cdot C_j, \quad F_j = -D_o^j(T) \cdot \partial C_j / \partial r$
 $\frac{\partial(r \cdot v_j)}{\partial r} = 0$

+ BC:

C_{j-1}	F_{j-1}	F_j	C_j
ρ_{j-1}	ρ_j		
u_{j-1}	u_j		

UO ₂	α-Zr(O)+(U,Zr)	(U,Zr)	α-Zr(O)	β-Zr	α-Zr(O)	ZrO ₂
UO ₂	α-Zr(O)+(U,Zr)	(U,Zr)	α-Zr(O)	α-Zr(O)		ZrO ₂
UO ₂	α-Zr(O)+(U,Zr)	(U,Zr)	ZrO ₂			
UO ₂	α-Zr(O)+(U,Zr)	(U,Zr)O ₂				
UO ₂	(U,Zr)O ₂					



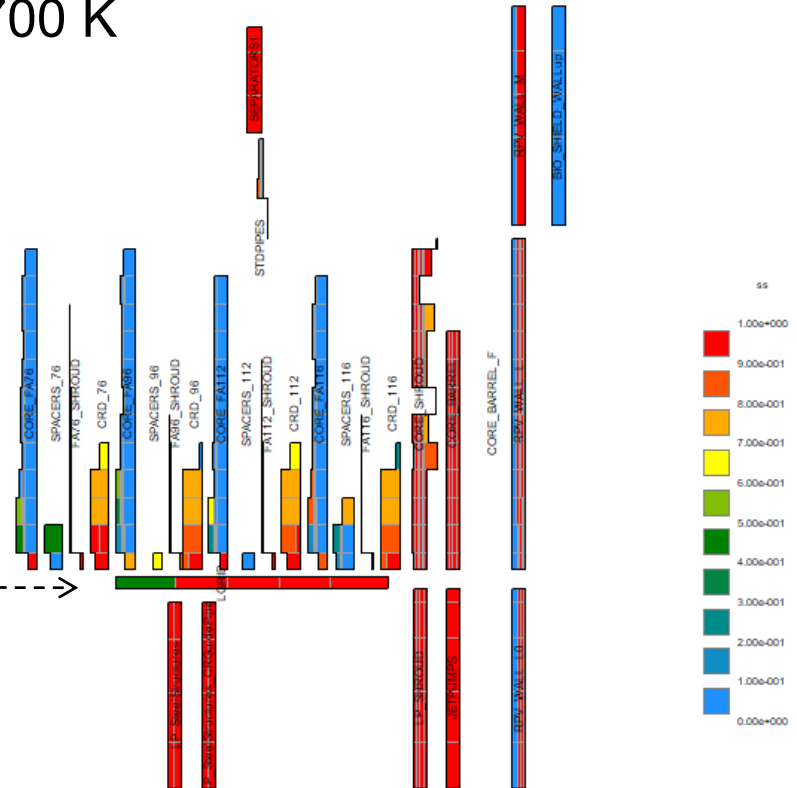
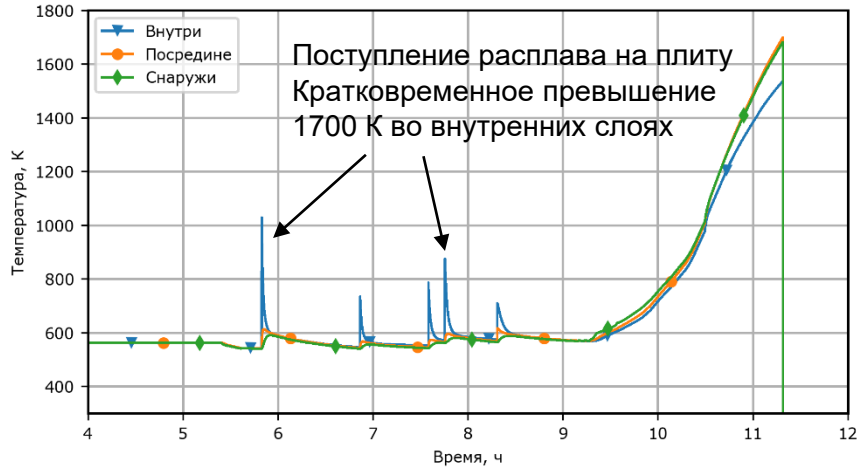
$M_O^2 = (M_O^2)_0 + K(T) \cdot S^2 \cdot \Delta\tau$
 $K(T) = A \cdot \exp\left(-\frac{B}{T}\right)$

Mo – масса, T – температура, τ - время

* Jean-Christophe Brachet et al., Early studies on Cr-Coated Zircaloy-4 as enhanced accident tolerant nuclear fuel claddings for light water reactors, Journal of Nuclear Materials 517 (2019)

<Пример критериальной модели>

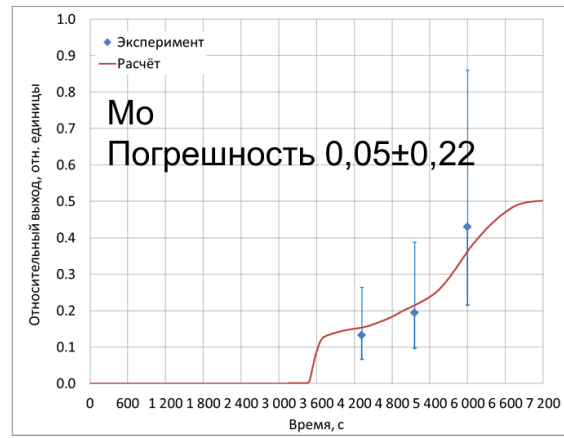
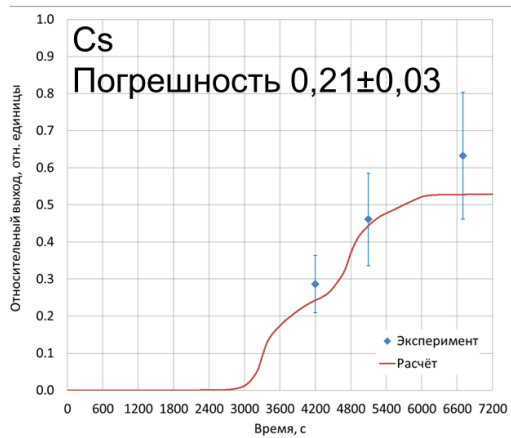
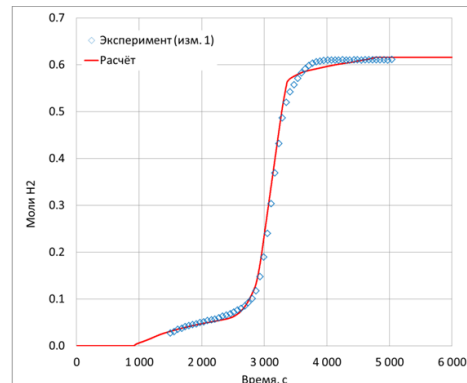
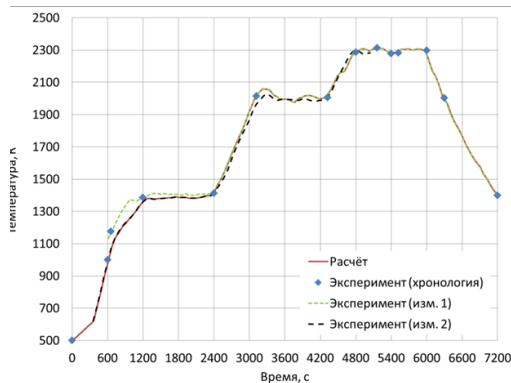
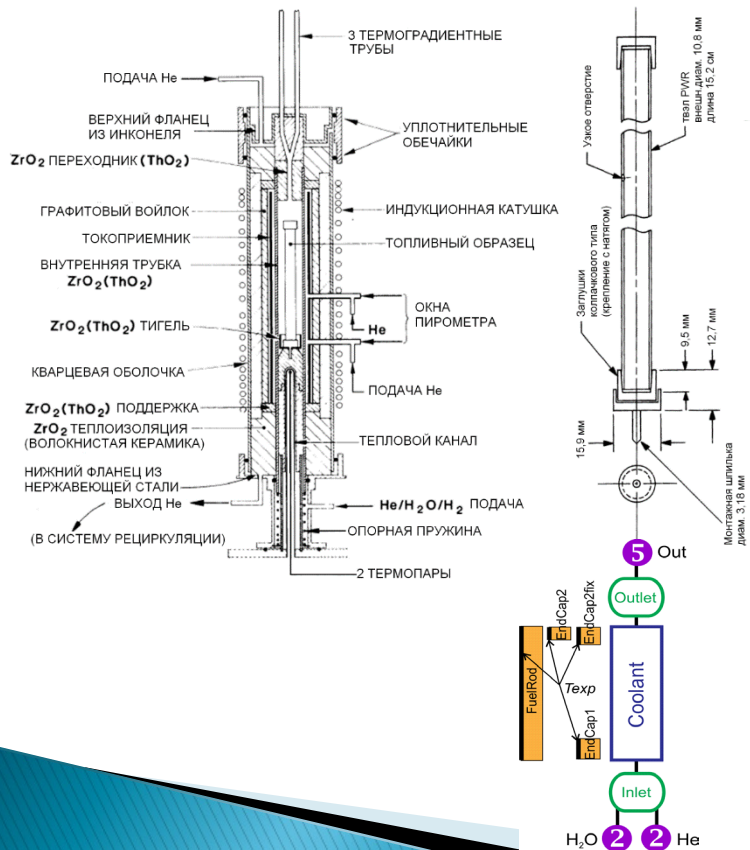
Разрушение нижней плиты а.з.: $T > 1700\text{ K}$



Решение: $F(T, \tau)$
или механическая модель

<Валидация физических моделей и их совокупности >

Выход ПД из облученного топлива при отжиге



4. Какой интегральный код выбрать?

СОКРАТ (Россия)



MELCOR, MAAP, SCDAP (США)



SAMPSON, ASYST-ISA (Япония)

Лицензия?

Разработка/адаптация?

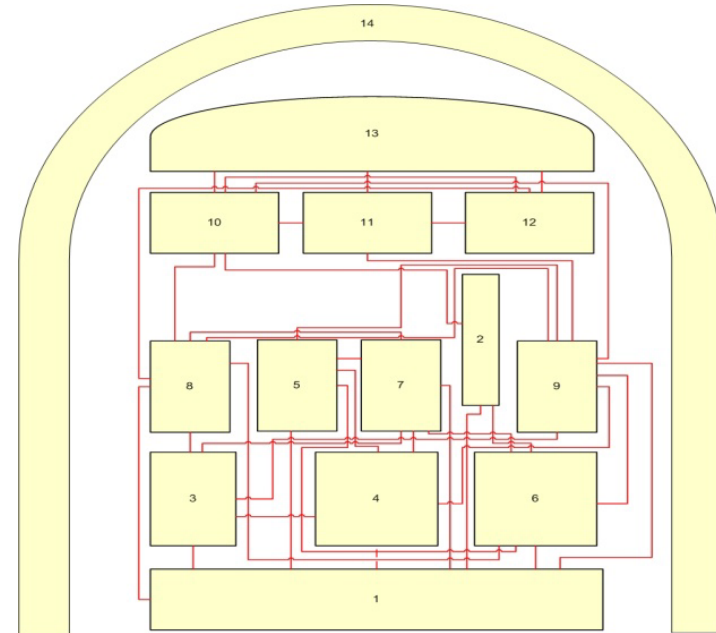
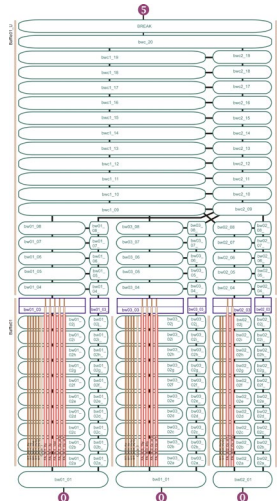
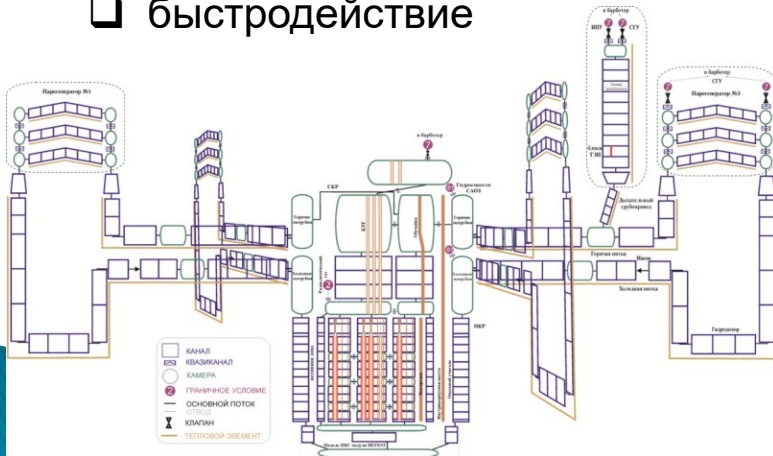
Валидация и аттестация?

Техподдержка?

5. Как правильно построить входной набор?

Разработка квалифицированного набора исходных данных об энергоблоке

- ❑ максимально гибкая и универсальная топология
- ❑ соответствие энергоблоку
- ❑ учёт результатов валидации
- ❑ быстродействие



<Соответствие проекту>

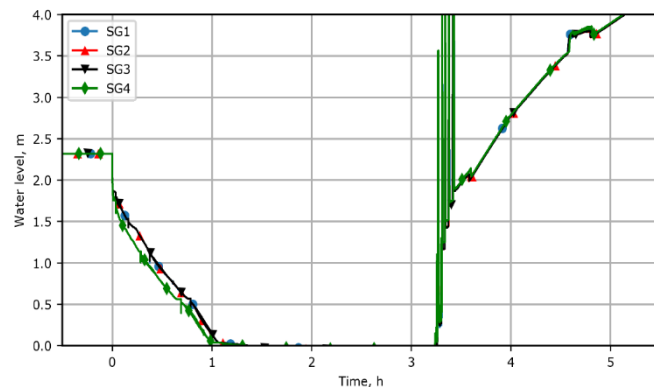
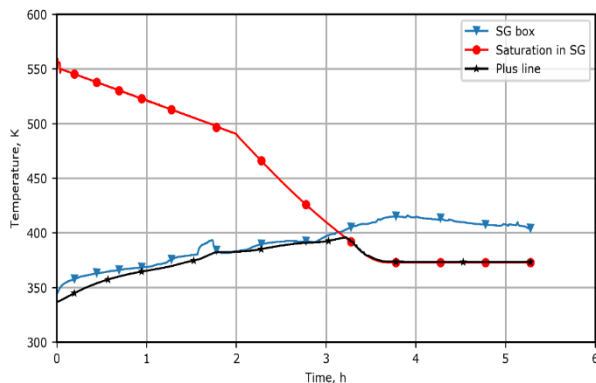
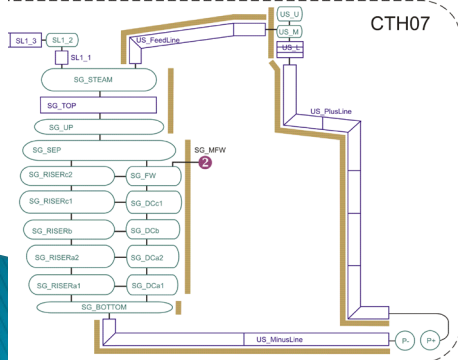
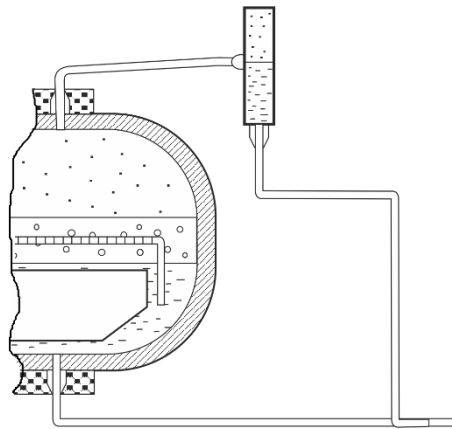
Учёт особенностей системы измерения уровня в ПГ – уроки Фукусимы

$$h_{\text{изм}} = \frac{4210 - \Delta P / g}{721}$$

Течь Ду40 из холодной нитки + полное обесточивание

1. Нагрев и выкипание воды в плюсовой линии уровнемера приводит к уменьшению ΔP и видимому росту уровня в осушенном ПГ

2. При течи Ду100 - влияние нагрева воды в уровнемере на АПЭН



6. Какие параметры варьировать при АН?

П.1.2.9 НП-001-15: АН для ЗПА

П.1.2.16 НП-001-15: Реалистический анализ

Учёт неопределённостей знаний о:

- определяющих процессах (параметры моделей):
температура потери устойчивости ТВС, давление отказа ГО
- технологических параметрах (мощность РУ, температура в ГЕ САОЗ, окр. воздуха, содержание Fe в бетоне, ...)
- допусках на размеры конструкций (оболочки твэлов, масса UO₂, ...)
- свойствах материалов (механические свойства сталей при высоких Т)

Исключаем из АН:

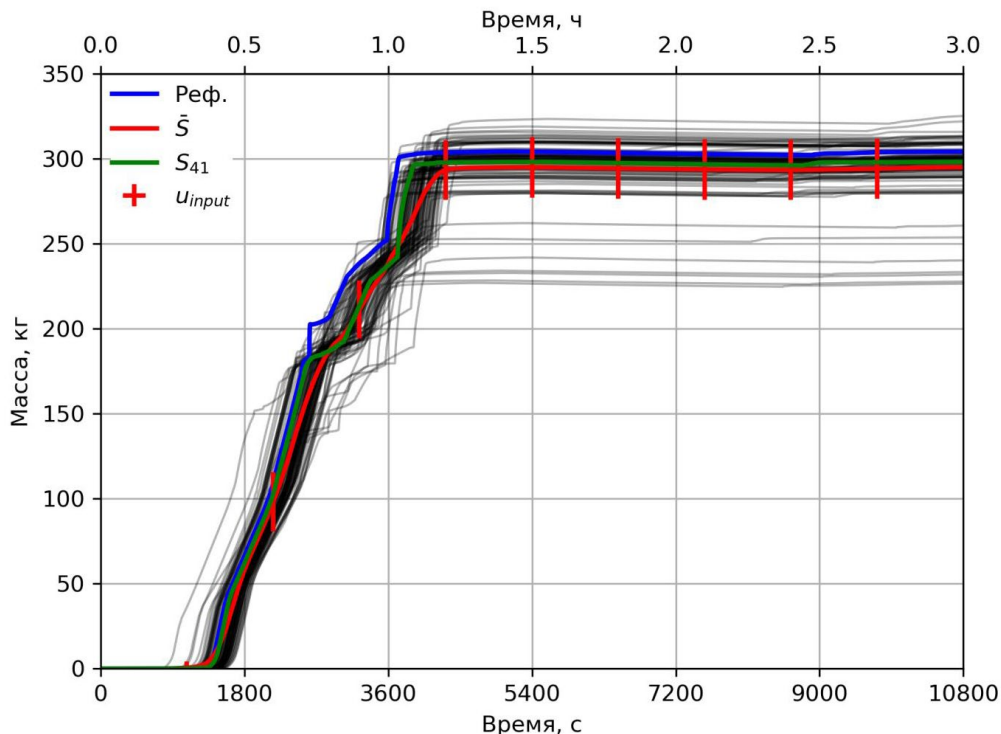
- Фиксированные параметры моделей
- Сценарные параметры

Диапазон, функция распределения:

- Должны быть разумными
- Должны быть обоснованы

<Анализ неопределённости источника H2>

Течь Ду850 из холодной нитки
+ полное обесточивание



\bar{S} – наилучшая оценка в данный момент времени

Из-за множества вариантов средняя скорость генерации H2 в районе 1 ч уменьшается !

S_{41} – ближайший к \bar{S} отдельный расчёт (№41)

u_{input} – СК0 (1 σ) по статистике

Наилучшая оценка получается с учётом:

- неопределённости расчёта,
- результатов валидации
- и чувствительности к сетке

Математическая модель энергоблока ВВЭР для анализа ТА

Включает:

- Выделение ключевых моделируемых систем
- Описание феноменологии
- Программа для ЭВМ
- Описание физмоделей
- Результаты валидации ПрЭВМ
- Аттестационный паспорт
- Руководство пользователя
- Квалифицированные входные наборы
- Рекомендации по АН
- Практические примеры

Заключение

- ❑ Сформулированы методические подходы к созданию матмодели энергоблока для анализа ТА на ВВЭР
- ❑ Показаны практические примеры использования этих подходов на примере ПрЭВМ СОКРАТ
- ❑ Сформулированное понятие матмодели энергоблока позволяет сохранить, развивать и передавать знания о технологии ВВЭР в части анализа ТА
- ❑ Представленный подход универсален и может быть распространён (адаптирован) на другие объекты и условия

Спасибо за внимание

dolganov@ibrae.ac.ru
www.ibrae.ac.ru

