



РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

**Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ БЕЗОПАСНОГО РАЗВИТИЯ АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ**

ИБРАЭ РАН

Россия, 115191, Москва, ул. Большая Тульская, д. 52 (E-mail: pbl@ibrae.ac.ru)

Уроки Чернобыля и Фукусимы и современные концепции управления «тяжелыми» авариями

**чл.-корр. РАН
Л.А. Большов,
директор ИБРАЭ РАН**

25 мая 2016 г.

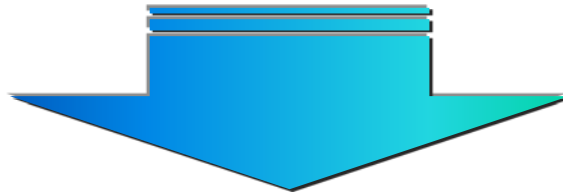
Оценка причин и последствий аварии на ЧАЭС

СССР/Россия

Минздрав
Минсредмаш
АН СССР/РАН
МЧС
Росатом
Росэнергоатом
Минсельхоз и др.

Мировое сообщество

МКРЗ
ВОЗ
ФАО
МАГАТЭ
АЯЭ ОЭСР
Европейская Комиссия
ПРООН и др.



Последствия для здоровья населения ограничены

Последствия для страны и мировой энергетики глобальны

Медицинские последствия аварии на ЧАЭС

- **28 смертей из 134 заболевших острой лучевой болезнью** (пожарные и работники ЧАЭС);
- **до 40% из 748 случаев рака щитовидной железы** у детей (на момент аварии), выявленных в 4-х областях России, 1 смерть, остальные вылечены;

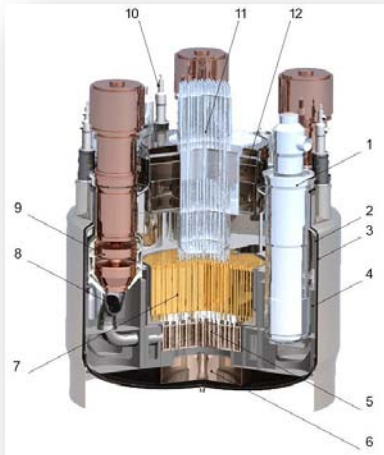
**Смертность ликвидаторов соответствует
контрольному уровню по России**

Значение и уроки аварии на ЧАЭС

- **Изменение отношения российского атомного сообщества к тяжелым авариям на АЭС:**
 - модернизация АЭС и совершенствование систем безопасности;
 - повышение культуры безопасности за счет гармонизации норм и правил;
 - внедрения концепции глубокоэшелонированной защиты и научно обоснованного подхода к анализу аварийных процессов.
- **Внедрение приоритетов безопасности в область проектирования, сооружения, эксплуатации и управления.**
- **Совершенствование профессиональной подготовки персонала за счет установки полномасштабных тренажеров на атомных станциях.**

Безопасность ядерных установок на рубеже 21 века

- Культура безопасности, независимый регулятор, ответственность оператора.
- Модернизация действующих установок, разработка поколения 3+.
- Создание новых систем безопасности (ловушка расплава, двойная оболочка...).
- Расчеты и эксперименты за пределами проектных режимов.
- Новые принципы обеспечения безопасности (естественная безопасность).



Моделирование – основной инструмент исключения тяжелых аварий

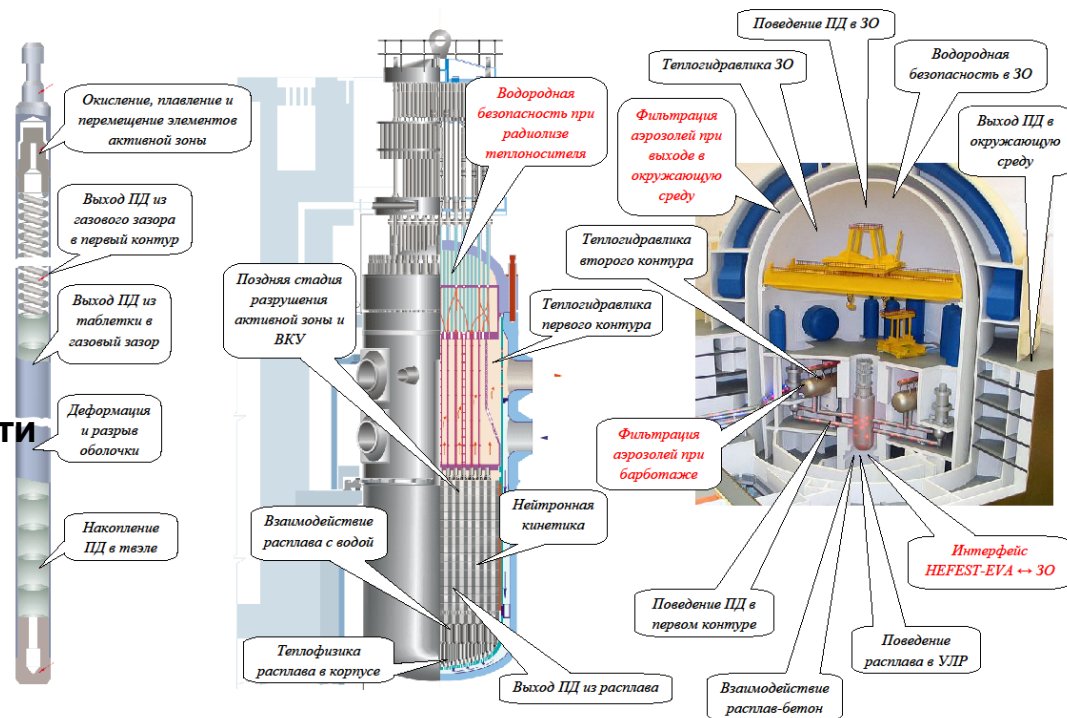
Российский код СОКРАТ – один из лучших в мире тяжелоаварийных кодов

Расчетный код СОКРАТ:

моделирование аварийных процессов
от исходного события до выхода
активности за пределы защитной
оболочки.

Ключевые задачи:

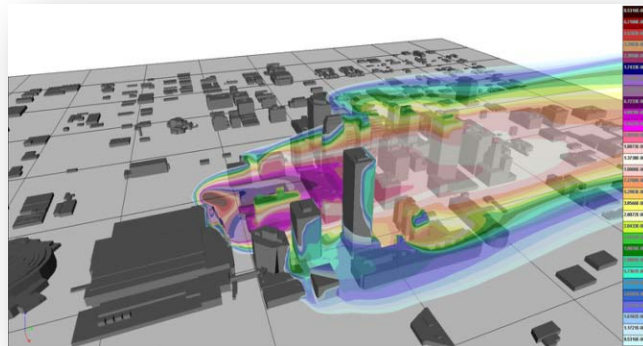
- Обоснование водородной безопасности для АЭС.
- Обоснование исходных данных для проектирования устройства локализации расплава (УЛР) АЭС-2006.
- Обоснование радиационной безопасности.



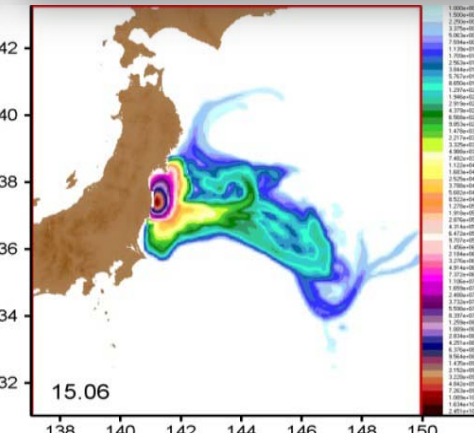
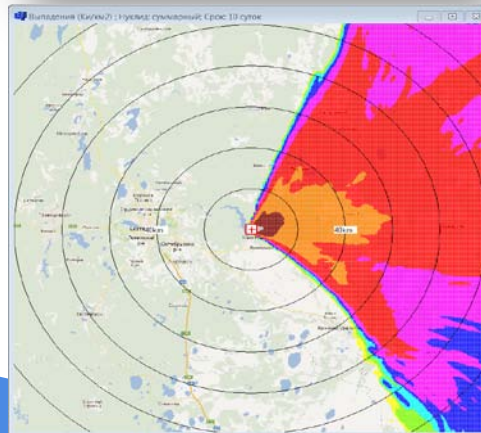
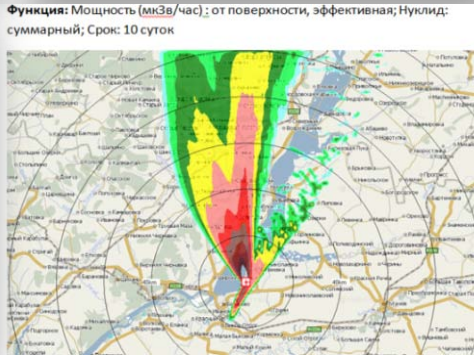
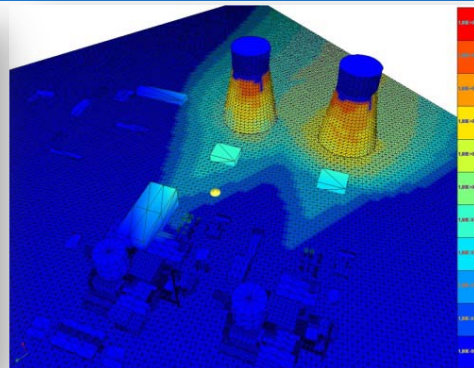
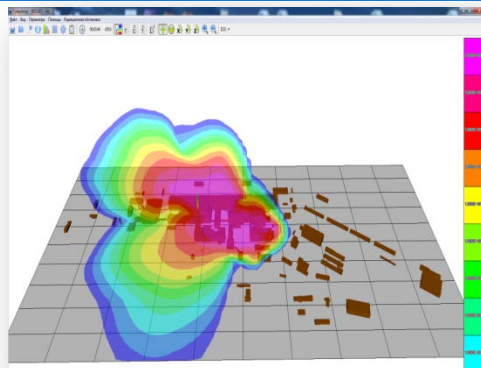
Разработчики: ИБРАЭ РАН, ФГУП РФЯЦ-ВНИИЭФ, РНЦ «Курчатовский институт»,
ОАО СПБАЭП, ГНЦ РФ-ФЭИ, ОАО «ЭНИЦ», ОКБ «Гидропресс», ОКБМ

Радиационный контроль и аварийное реагирование

- Высокоорганизованная межведомственная система готовности к реагированию на угрозы радиационного характера.
- Автоматизированные ведомственные и территориальные системы радиационного мониторинга.
- Высокоскоростные резервируемые системы связи, оповещения, специальная техника, высокотехнологичное оборудование.
- Система центров научно-технической поддержки, программно-аппаратные средства оперативной оценки, анализа, прогноза ситуации, экспертиза.
- Профессиональные аварийно-спасательные службы министерств и ведомств.



Программно-технические комплексы (ПТК) для оценки и анализа последствий аварий



- Комплекс современных моделей.
- Эффективные численные алгоритмы.
- Базы данных и знаний.

Анализ и прогноз

- Развитие возможных инцидентов и аварий на ЯРОО.
- Распространения радиоактивности в воздухе, воде, почве.
- Параметры радиационной обстановки.
- Дозы облучения населения.
- Рекомендации по реагированию и мерам защиты населения, территорий и минимизации последствий аварий.

Анализ аварии на АЭС «Фукусима-1»

Готовность российской системы аварийного реагирования к быстрому развитию событий.

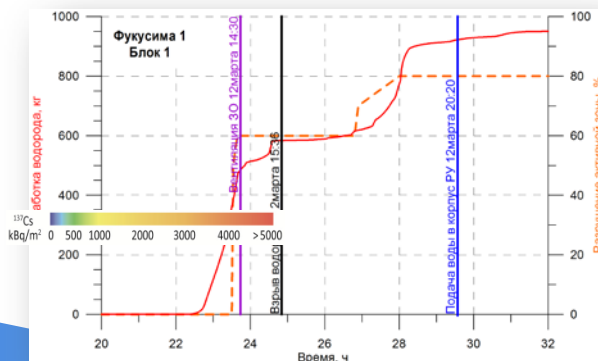
Менее чем за сутки:

- Подготовлены исходные данные для реакторной установки на АЭС «Фукусима-1» (BWR).
- Оценены времена и количество образовавшегося водорода и дан прогноз по динамике развития аварии.
- Оценены выходы продуктов деления.
- Подготовлены исходные данные и выполнено моделирование атмосферного переноса.

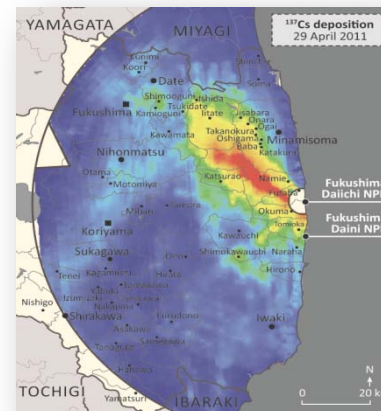
№ блока	Активность выброса, Кюри		
	^{131}I	^{134}Cs	^{137}Cs
1	$1,68 \cdot 10^7$ (выход через 31.2 часа)	$0,5 \cdot 10^7$ (выход через 35.5 часа)	$0,35 \cdot 10^7$ (выход через 35.5 часа)
2	$0,47 \cdot 10^8$ (выход через 77.3 часа)	$2,24 \cdot 10^7$ (выход через 84 часа)	$1,3 \cdot 10^7$ (выход через 84 часа)
3	$0,27 \cdot 10^8$ (выход через 60 часов)	$1,14 \cdot 10^7$ (выход через 62.4 часа)	$0,65 \cdot 10^7$ (выход через 62.4 часа)

Оценка времени взрыва водорода на АЭС «Фукусима-1»

№ блока	Расчетное время взрыва	Фактическое время взрыва
Блок 1	12.03 15:16	12.03 15:36
Блок 2	15.03 05:45	15.03 06:14



Оценка плотности выпадений Cs-137



Результаты радиационной разведки МЕХТ, Япония, (2011),
Максимум - 15.5 МБк/м²

Моделирование ИБРАЭ (2011),
Максимум - 70.0 МБк/м²

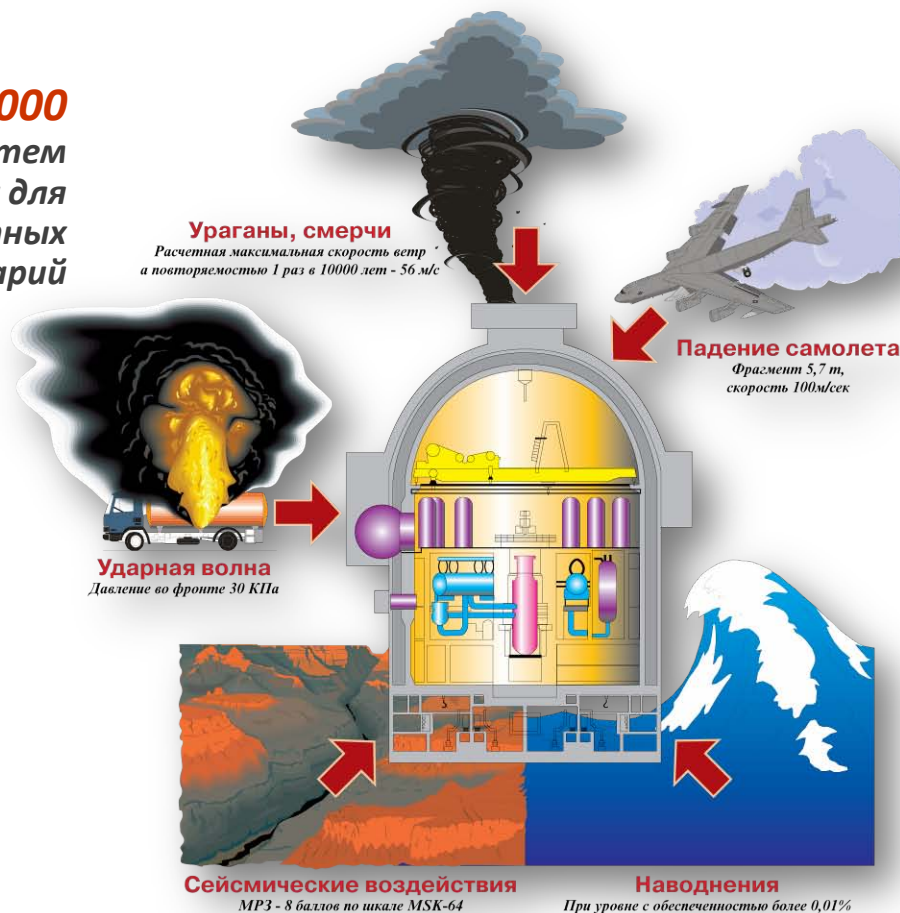
Фукусима: общие уроки

- Подтверждение основных принципов обеспечения безопасности, детерминистского подхода.
- Новый класс аварий – экстремальные воздействия, вызванные природными катаклизмами и/или иными внешними воздействиями с отказом всех или почти всех систем обеспечения безопасности.
- Множественные аварии одновременно на нескольких блоках.
- Противоречие между современным уровнем науки о тяжелых авариях и готовностью персонала разбираться и действовать в условиях ТА.

Обеспечение современного уровня безопасности, учет внешних воздействий

АЭС с ВВЭР-1000

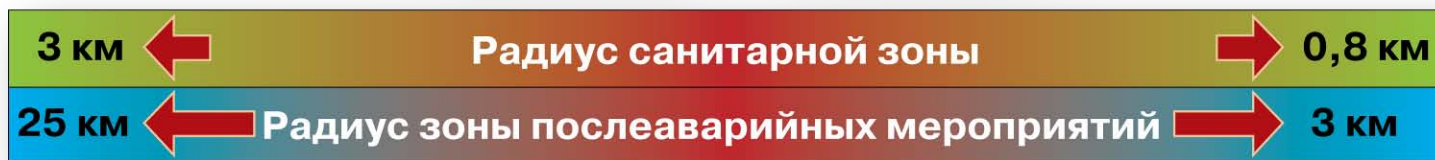
Использование систем безопасности для преодоления проектных аварий



АЭС-2006 (ВВЭР-1200)

Применение пассивных средств в системах безопасности – воздушный СПОТ.

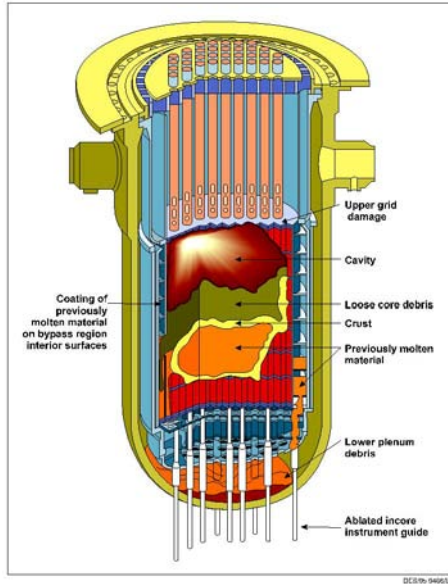
Применение средств управления запроектными авариями – вторая оболочка, ловушка расплава



ОСНОВНЫЕ ВЫЗОВЫ

- Обеспечение целостности герметичного контура циркуляции при проектных и запроектных авариях.
- Обеспечение целостности защитной оболочки как последнего барьера безопасности и длительный отвод остаточного тепловыделения при тяжелых авариях:
 - Обеспечение водородной безопасности;
 - Удержание расплава в корпусе;
 - Устройство локализации аварии.
- Обеспечение аварийной готовности и ограничение радиационных последствий.

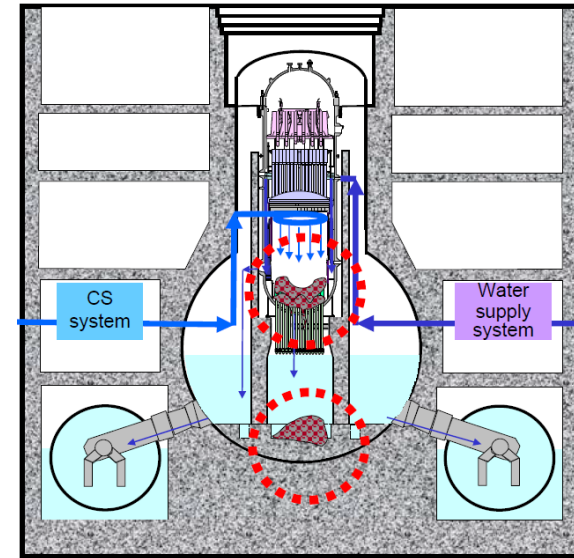
ТМІ: Чернобыль–Фукусима



ТМІ – предотвращение аварии за счет удержания в корпусе



4 блок ЧАЭС – застывшие топливосодержащие массы из паросбросного клапана

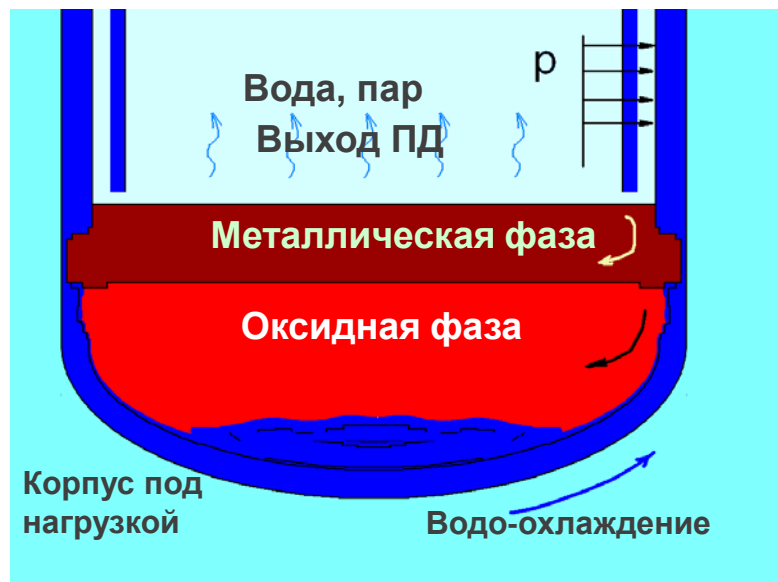


Фукусима 1–3 – предполагаемая конфигурация топливосодержащих масс

Удержание расплава в корпусе ВВЭР/LWR

- Механизмы теплопередачи от расплава к корпусу реактора (или ловушки) вследствие конвекции и теплопроводности
- Физико-химические процессы в сложных многокомпонентных расплавах (основные компоненты UO_2 , ZrO_2 , Zr , SS)
- Фокусировка теплового потока вследствие разделения фаз
- Теплоотвод к окружающей воде
- Механическое поведение дна в условиях неоднородных тепловых нагрузок
- Тяжелая металлическая фаза внизу

Классическая картина, Theophrastus



По результатам проектов ОЭСР Расплав-Маска



Удержание расплава в корпусе ВВЭР/LWR (2)

АЭС малой мощности:

возможно и реализовано в технических решениях для ВВЭР-440 за рубежом – АЭС Ловииса (Финляндия), Пакш (Венгрия), Дукованы (Чехия), Моховце (Словакия).

АЭС средней мощности:

обосновано для проектов AP-600, ВВЭР-600, ВВЭР-640.

АЭС большой мощности (1000 МВт и более):

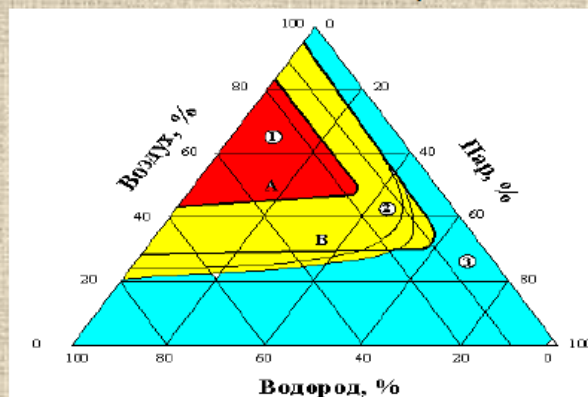
необходимы дополнительные исследования возможности удержания при сценариях с расплавлением а.з через 72 часа.

Обеспечение водородной безопасности

- В процессе тяжелой аварии на АЭС с реакторными установками с водой под давлением выделяется значительное количество водорода.
- Существуют физические причины, способствующие образованию локальных областей горючих и детонационных смесей (стратификация).
- Существуют механизмы, разрушающие концентрационную и температурную стратификации.

Диаграмма Шапиро-Моффети

- Процесс дефлаграции возможен при концентрациях H_2 4-80 %, воздуха ≥ 20 % и водяного пара не более 60 %.
- Детонация возможна при концентрациях H_2 20-55%, воздуха $\geq 35\%$ и водяного пара $\leq 33\%$.



Треугольная диаграмма Шапиро - Моффети

А-область детонации
В-область дефлаграции

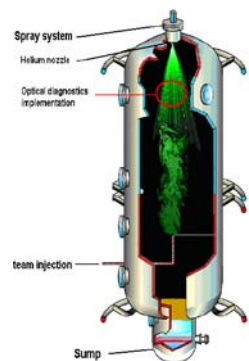
Причины образования и разрушения локальных неоднородностей

- Силы плавучести, обусловленные пониженной плотностью пара и водорода (концентрационная и температурная стратификации);
- Конденсация пара – смещает состав смеси газов (воздух-пар-водород) в область опасных режимов вследствие:
 - работы конденсаторов-теплообменников в ЗО (СПОТ ЗО в АЭС с ВВЭР-1200 и ССАД в ПТАЭС с РУ КЛТ-40С);
 - конденсации пара на поверхностях стен и внутренних строительных конструкций;
 - конденсации пара при орошении ЗО спринклерным раствором;
- Работа пассивных каталитических рекомбинаторов, снижающих количество водорода в ЗО;
- Образование конвективных течений, вызванных, в частности:
 - различиями в температурах газа и конструкций (естественная конвекция);
 - охлаждением газа при работе конденсаторов-теплообменников (естественная конвекция);
 - инъекцией спринклерного раствора (увлечение газа каплями – вынужденная конвекция);
 - инъекцией струи пара с повышенной скоростью.

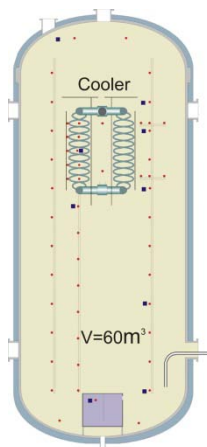
Экспериментальные проекта ERCOSAM-SAMARA

- 5 установок разного масштаба (16 тестов);
- единый сценарий тестов;
- связанные начальные и граничные условия;
- 3 системы безопасности (спринклер, ПАР, кулер);

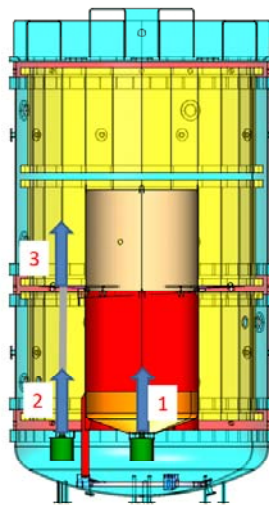
- Влияние масштабного фактора;
- Эффект сложности геометрии.



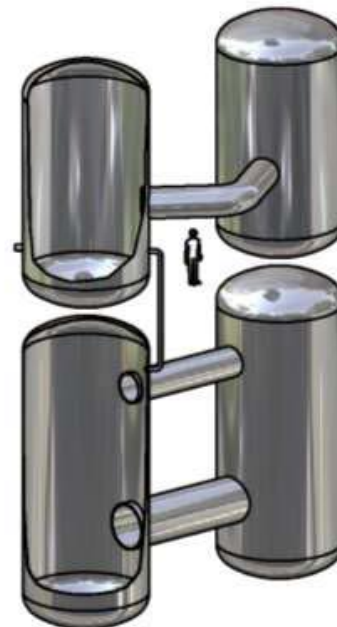
3 теста на
TOSQAN
(FR), 7м³



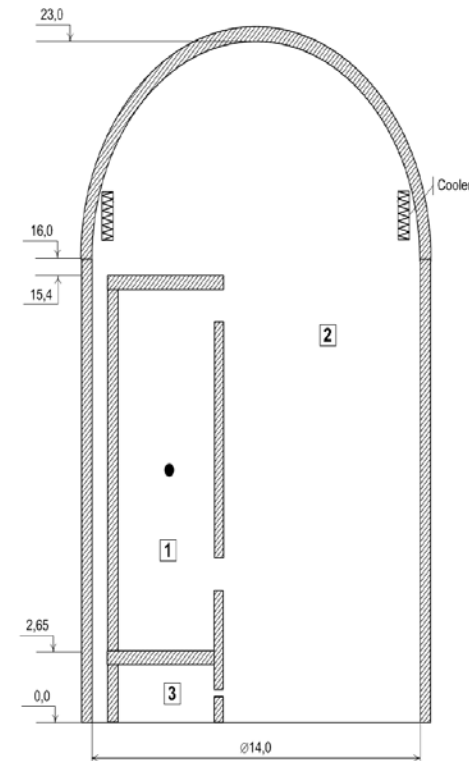
2 теста на
SPOT (RU),
60м³



4 теста на
MISTRA (FR),
100м³

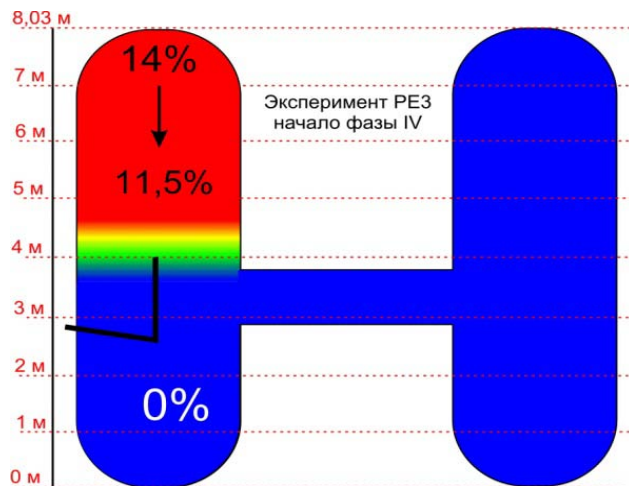


5 тестов на
PANDA (CH),
2x90 м³

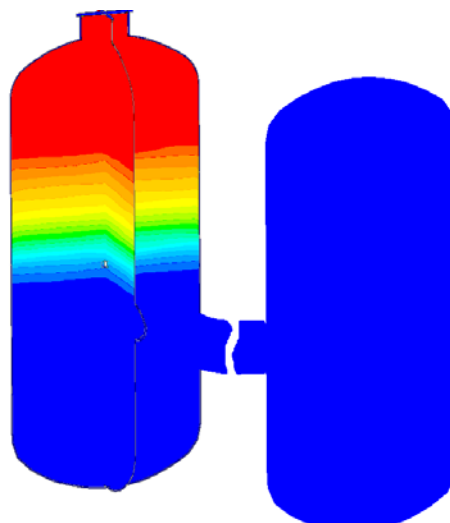


2 численных
бенчмарка на
концептуальной
HYMIX (RU),
3181м³

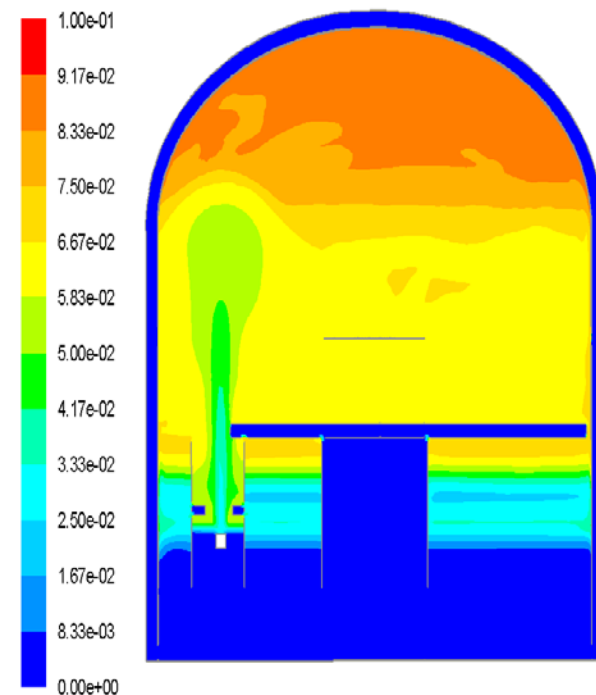
Аккумуляция водорода на фазе разрушения активной зоны



Маломасштабный эксперимент РЕЗ на установке PANDA



Расчет эксперимента с помощью CFD модели



Расчет реального объекта с помощью CFD модели

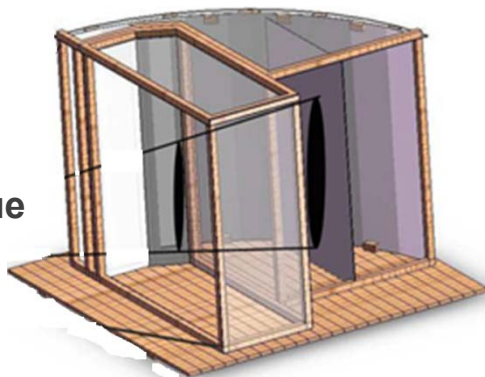
Расчетно-экспериментальная программа распространения и горения водорода

Концерн «РЭА», МосАЭП, ВНИИТФ, ИБРАЭ РАН, НИЦ КИ

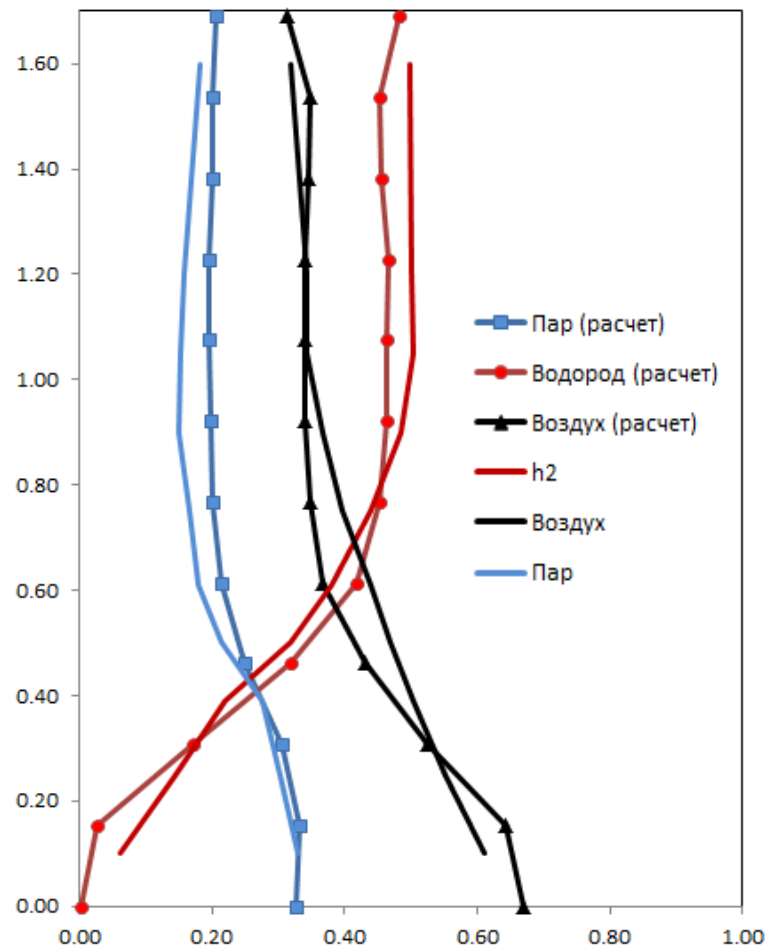
Расчет по коду КАБАРЕ эксперимента
БМ-ЛЗ-2 (без макета ПГ)

1. Локальные испытания на пределы горения:
на установке КЭИП (сфера) – 419;
на установке МУТ (ударная труба) - 79

2. Интегральные
испытания на
распространение и
горение ВПГС (легкие
конструкции) - 18



3. Интегральные
испытания на
распространение и
горение ВПГС (прочные
конструкции) - 15



Изменение по высоте [м] мольных долей
на момент окончания эксперимента

Заключение

- Важность детерминистического подхода в концепции безопасности – расширение перечня запроектных и тяжелых аварий, списков исходных событий с учетом технических отказов, человеческого фактора, возможных природных и техногенных катастроф.
- Сохранение уровня компетенции в ТА области: снижение уровня работ по повышению безопасности АЭС недопустимо.
 - Поддержание на должном уровне компетенций в области безопасности и тяжелых аварий.
 - Поддержание на должном уровне компетенций в области аварийного реагирования и аварийной готовности
 - Участие в международных проектах.