



**Безопасность ядерного топливного цикла и установок
термоядерного синтеза: проблемы и математические модели**
Лекция 1

**Ядерная энергетика в контексте энергетической безопасности.
Безопасность ядерной энергетики и модели аварийных событий**

Филиппов Александр Сергеевич

Зам. зав. каф. Проблем безопасного развития современных энергетических технологий
Лектор 4-го и 5-го курсов кафедры

- **Энергетическая безопасность и её физические основы – общие замечания:**
 - закон Ломоносова-Лавуазье определяет требуемые характеристики источников энергии;
 - проблема безопасности энергетики – это не энергобезопасность, но каждая очень важна;
- **Безальтернативность ядерной энергетики на "безуглеродную" перспективу;**
- **Что производит АЭС. Аварии, их опасности, факторы развития;**
- **АЭС как объект исследования и обеспечение объективности исследования –**
Физика + Техника → Математич. моделирование – прогноз – меры безопасности ...
- **Примеры**
- **Заключение**

Энергия, энергетика и энергетическая безопасность

Энергетика – основа современного материального благополучия. Без преувеличений.

Энерговооружённость определяет объём добычи и переработки минеральных, биологических и др. ресурсов, исследования, направленные на интенсификацию и глубину этих добычи и переработки, т.е. промышленное производство – основу бытия.

Энергия обеспечивает комфорт бытия и его безопасность, в самом широком смысле.

Гарантия доступа к источникам энергии в требуемых количествах это, собственно, и есть энергетическая безопасность. Но что здесь означает «доступ»? И – «гарантия»?

Не останавливаясь на экономико-политических аспектах, отметим главное – примат физических законов относительно все остальных: чтобы тратить энергию, надо иметь её источник – (Ломоносов-Лавуазье, XVIII в.). Насколько хороши источники разных типов? – Требуется максимально объективное сравнение: *научное*.

Первичный физический анализ источников энергии, т.е. разных видов энергетики, должен основываться на **з-не сохранения энергии в интегральной и дифференциальной формах. Это интеграл по времени и мощность источника - наличие. И параметр потока энергии - отбор.**

Сравнение показывает безальтернативность ядерной энергетики. Но сначала - критерии.

Общие характеристики источников энергии (1/2)

Пусть W – полные энергозатраты в данной области Ω (стране) за год. Энергия тратится неравномерно, поэтому более информативна мощность генерации Q , которая будет функцией времени и пространства: $Q=Q(x,t)$, $x \in \Omega$.

В каждой точке области Ω , в каждый момент времени **мощность генерации должна соответствовать средней Ω_0 и пиковой Ω_{\max} потребности**, т.е. источник должен быть не ниже заданной величины и допускать её превышение, если потребуется. Это и будет «доступностью» источника энергии – наличие генерации (электричество, газ для отопления).

Что касается «гарантии», то её можно определить как степень уверенности в «доступности» источника энергии, т.е. в обеспечения данных Ω_0 и Ω_{\max} за счёт $Q(x,t)$.

С точки зрения физики, доступность – это оценка интеграла и мощности физического источника (уровень воды в плотине, запас топлива, поток солнечного излучения, ветер ...).

Гарантия основана на прогнозе вариации $Q(x,t)$. **Проектный максимум Q** – это база прогноза. Но **средняя выработка ниже**: простои и отказы – КИУМ: понижающий множитель для интеграла W (~20-25% у ВЭ) – фактическая выработка. **Отказы неприемлемы для непрерывных производств, коммунальных служб, систем безопасности** (в самом широком смысле), здесь «гарантия»=100% – ε , где ε очень мало. **Для пиковой нагрузки нужен ещё запас мощности ... Всё это – реальность энергопотребления – вполне понятная.**

Ещё один параметр источника $Q=Q(x,t)$ можно определить как «степень реализуемости» с точки зрения отъёма наработанной энергии. Это затрагивает ряд других аспектов, но по физике **удобным критерием служит поток энергии [Вт/м²], зависящий от размеров источника.** Размер может оказаться неприемлемо большим с точки зрения требований к Ω_0 , Ω_{\max} и др.

Наконец, но не в последнюю очередь, **важнейшим критерием источника энергии является его безопасность, непосредственно для людей и окружающей среды.** Это, в первую очередь, ограничения на последствия катастроф (крупных инцидентов), на вредные выбросы, на отходы производства.

Критерии ограничений по безопасности могут быть ясны (последствия катастроф) или не очень (генерация некоторого количества углекислоты ...). Или ограничения могут быть преодолены в будущем (ОЯТ ...). Далее введён некоторый общий критерий сравнения.

Безопасность источника энергии – это совсем иное, чем «энергобезопасность» и стоит особняком среди прочих параметров. Особенно для ЯЭ (самой безопасной, кстати).

Но, так или иначе, неучёт характеристик источников по энергобезопасности и безопасности энергии чреват перекосами в энергетике, и в перспективе – тупиком. Далее – примеры.

- **Выбор источников на текущий момент, в общем, невелик:**
 - Ископаемые углеводороды – **УВ** (уголь, нефть, газ ...)
 - Энергия *расщепления* атома – «атомная» или «ядерная» энергия – **ЯЭ**;
 - Энергия *синтеза* ядер атомов – УТС: да, конечно ..., но есть "закон $t + 50$ " ... ;
 - «Альтернативные» или «возобновляемые» источники (кин. энергия ветра и лучистый поток энергии Солнца, которое есть источник практически всего текущего «возобновления») – **ВЭ**;
 - Гидроэнергия (ВЭ) – не обсуждается, т.к. ограничена и по доступу близка к исчерпанию.
 - **УВ – это ~2/3 мощностей** - Отличная вещь, особенно, газ. Но – «заканчиваются» (уже лет 30 ...), кроме, разве, угля. Когда «закончатся», станут дорогими и менее экологичными по добыче.
-
- **Таким образом – стоит сравнивать только ВЭ и ЯЭ. Показатели:**
 - **Физические – плотность потока энергии и КИУМ**;
 - **Экономические – не обсуждаются; требование бесперебойности – понятно ;**
 - **Безопасность – обсуждается ...**

Поток энергии : F [Вт/м²] (см., например, П.Л.Капица, Нобелевская лекция)

При любой генерации энергии источник [Вт/м³] снимается через поток с поверхности [Вт/м²] :

$$\int_{\Omega} q(x, y, z) d\Omega = \oint_{\partial\Omega} \mathbf{F} \cdot d\mathbf{A} = Q \quad \text{Оценочно:} \quad Q \sim \bar{q}\Omega \sim F A, \quad A \sim Q/F, \quad R \sim (Q/F)^{1/2}$$

- Здесь A – площадь съёма потока энергии, R – пространственный масштаб, $A \sim R^2$

Для электростанции - берём занимаемую площадь и оцениваем размер участка $R \sim (Q/F)^{1/2}$

При данном потреблении мощности Q :

- Большая энергонапряжённость – малый размер R – большой поток F (Вт/м²)
- Малая энергонапряжённость – нужен большой размер R , т.к. малый поток F

И обратно:

- малый поток при заданном источнике – требует большой размер энергоустановки;
- большой поток – достаточен малый размер установки ...

Пример: Солнце: $F \sim 10\text{-}50$ Вт/м², но к.п.д. $< 0,1$; АЭС: $F \sim 1$ ГВт/км² = 1000 Вт/м² – 3 порядка !

Больше размер – больше площадь отчуждения, больше коммуникаций, больше вреда ...

Пример: показатель плотности мощности (на м²) АЭС и ветропарка

- **АЭС**: 0,5 -1 ГВт/эл. блок занимает площадь не более **1 км²** (НВАЭС-2: 0,76 км²)
- 0,63 ГВт (макс.!) офшорный **ветропарк** (~10 км от устья Темзы) занимает, по Inet ссылкам, ок. **100 км²** (Технологический/стоимостный предел мощности «ветровой единицы»?)



**АЭС Loviisa,
ВВЭР-440
(0,5 ГВт эл.)**

АЭС с PWR-1000: 1 ГВт эл.



~ 50 м
↔

~1000 м
↔

175 ед. 3,6 МВт max -
(высота 87 м, ветер 3-25 м/с: КИУМ 0,2)



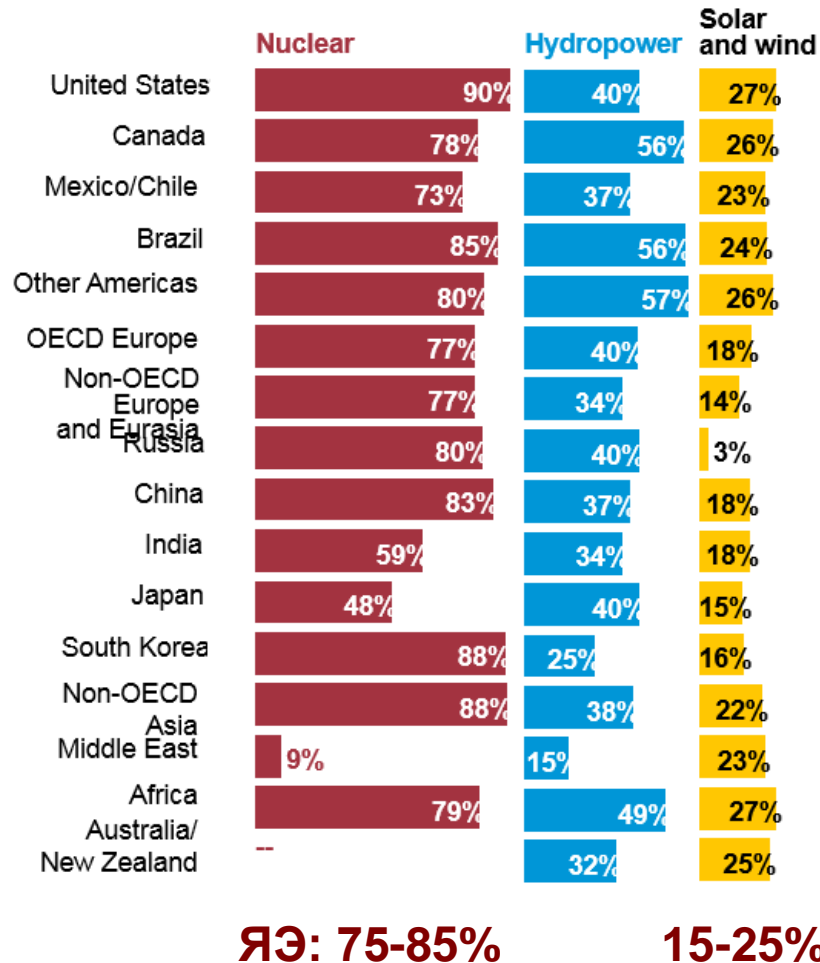
~0,12 ГВт

~1 ГВт

КИУМ: коэфф. использования установленной мощности, и бесперебойность

- КИУМ: как работает источник – заложенные возможности vs. фактических условий

Average annual capacity factors for electricity generators by IEO region and energy source, 2008–12 percent



Бесперебойность – обратная сторона КИУМ.

Энергетическая безопасность с данным источником энергии включает ответ на вопрос:

Может ли данный источник *надёжно* обеспечивать мощность, необходимую *для промышленности*?

- Если – не может, то источник – «альтернативный», дополнительный к безальтернативным.
- Из надёжных источников *промышленной энергии* кроме ГЭ и УВ есть только ЯЭ.
 - Что не исключает вполне «альтернативное» энергоснабжение в районах с малым производством или большими ВЭ-ресурсами.
- Интегральные характеристики доступности источника могут быть получены как ответ на вопрос вида: «Способны ли ветряки произвести энергию, требуемую хотя бы для полного цикла производства ветряков?» - нужен расчёт

Безопасность источника энергии – степень вреда для здоровья

Количество смертей на произведенный тераватт-час по видам источников энергии

Источник с подробным описанием методики и исходных данных.



Уголь (в среднем по миру) – 161

Уголь (Китай) – 278

Уголь (США) – 15

Нефть – 36

Природный газ – 4

Биотопливо – 12

Торф – 12

Солнечная – 0,44

Ветряная – 0,15

Гидро (Европа) – 0,10

Гидро (весь мир, включая плотину

Баньцяо) – 1,4

Ядерная – 0,04

Источник: 

3.bp.blogspot.com/_VyTCyizqrHs...

Причины малости показателя для ЯЭ:

- Высокая плотность мощности ЯЭ – компактность АЭС, малое кол-во обслуживающего персонала на 1 ГВт эл.;
- Отсутствие вредных выбросов в окр. среду при штатной работе;
- **Жёсткие требования к безопасности АЭС:**
 - ~50% стоимости – системы безопасности: надёжность заложена в проекте;
 - контроль выполнения норм и правил, в том ч. расчётным путём – «анализ безопасности»: сейчас это проблема №1 (вместе с разработкой новых реакторов и АЭС) .
 - изучение развития аварийных ситуаций расчётным путём, и -
 - **это в обязательном порядке требует средств численного моделирования АЭС и окружения**

Итак, ядерная энергетика, в общем, выигрывает у ВЭ (кроме, разве, ГЭС) и по нескольким показателям, пожалуй, и у УВ энергетике.

Почему же АЭС так мало? Может ли энергетика во всём мире быть «как во Франции» (в недавнем прошлом ...)?

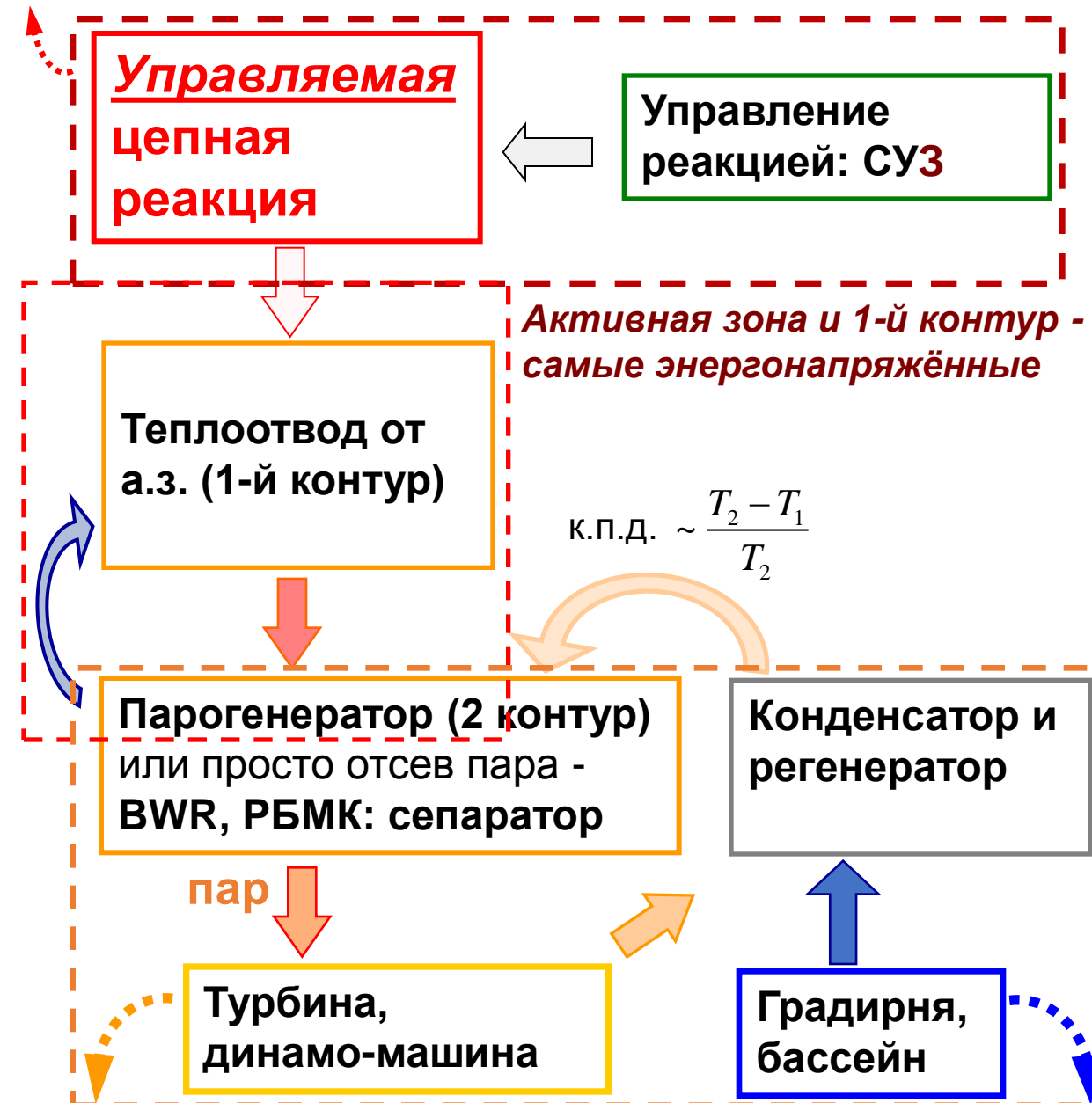
Ответ – в деталях. Всё это непросто и требует много работы ...

Кратко – об устройстве и работе АЭС

Как работает ?

- Что производит ?**
- Проблемы и пути их решения**

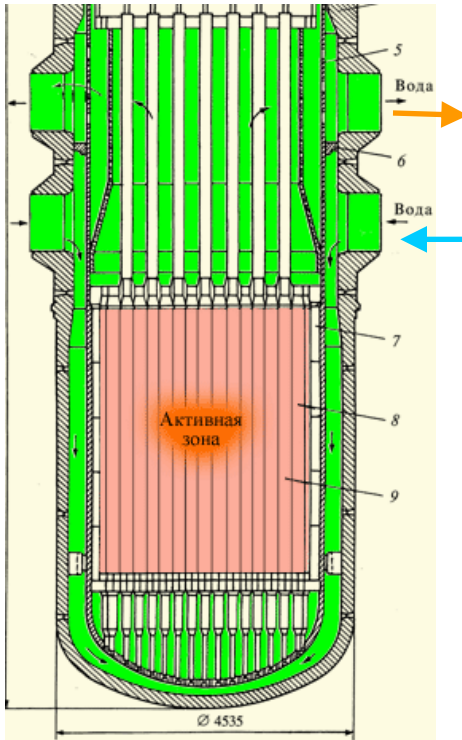
Получение электроэнергии в ЯЭУ через тепловую машину на АЭС



- Управляемая ядерная реакция деления – источник тепла, которое отдаётся -
 - Надёжный теплоотвод в 1-м контуре – несёт тепло *рабочему телу*, которое -
 - *Пар* нагревается в парогенераторе (2-й контур) и **совершает работу**, которая -
 - Вращение турбины и динамо-машины.
 - Остывший пар, пройдя регенераторы, идёт в парогенератор: тепловой цикл замкнут.
- Энергетические реакторы работают по такой схеме. Отличия – в цикле рабочего тела.
- Нагрев 25 т теплоносителя в работающем ВВЭР: ~30 К/с – Энергонапряжённость !
Потеря (водо)охлаждения – выкипание. Далее - плавление, распространение разрушений ...

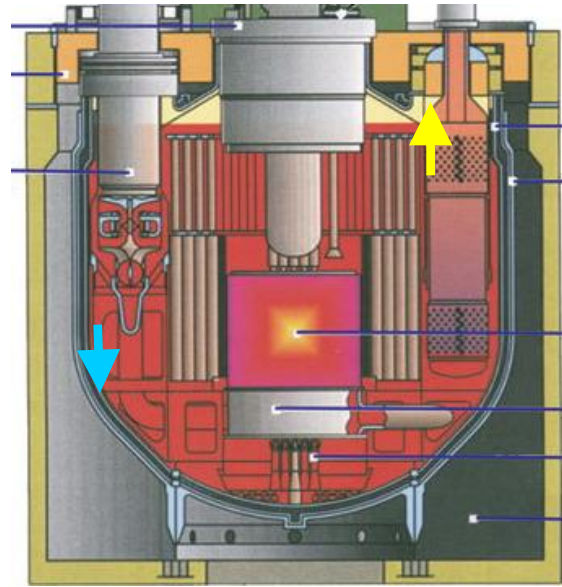
Как и чем топится атомный котёл – ядерный реактор

Основной делящийся материал в нынешних РУ: ^{235}U



Реакторы типа ВВЭР (PWR).

Надёжный и технологичный. Основной тип ЯЭУ (и BWR). Но –
- воспроизводство: $\text{KB} < 0,5$;
- отходы ОЯТ нарастают.
- тяжёлая авария была;
Дальняя перспектива – будут "разбавляться" р-ми БН.



Реакторы на быстрых нейтронах (БН-800).

Стоимость: (2-3)-кратная. Технологически сложнее и ныне - только в РФ. Но:
- возможен $\text{KB} > 1$;
- тяжёлую аварию трудно и придумать;
- часть будущего ЗЯТЦ.

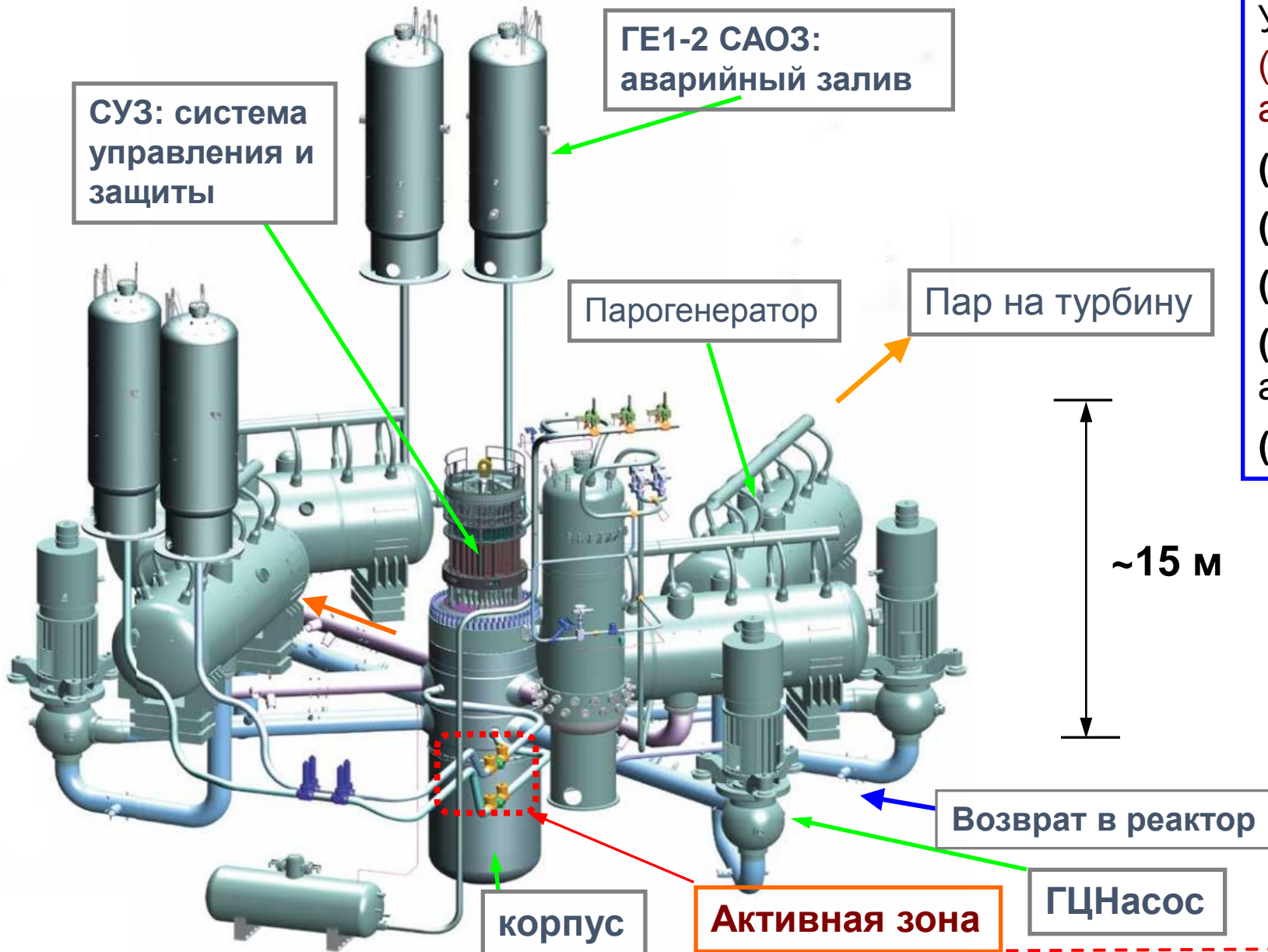
Цепная реакция (^{235}U): нейтроны от деления другого ядра (медленные (тепловые) или быстрые – в БН);

Трансмутация ^{238}U : захват быстрого нейтрона, испускание e^- : Np , Pu , ... ;

Основной источник тепла при делении – **кинетическая энергия осколков (>80%)**;

- В реакторе на **медленных нейтронах замедлитель** это чаще вода, она же и **теплоноситель: "водо-водяные" (ВВЭР)**
- В реакторе на **быстрых нейтронах теплоноситель – жидкий металл (Na)**;
- Большинство энергетических реакторов **водо-водяные (давление ~150 атм), оболочки твэлов – из Zr.** Это влияет на физику аварийных событий.

1-й контур и активная зона реактора ВВЭР-1200 – "топка атомного котла"



Узлы АЭС как барьеры безопасности (препятствия выходу наработанной активности):

- (1) твёрдая таблетка топлива;
- (2) герметичный твэл (~400 табл.);
- (3) прочно-плотный корпус;
- (4) защитная оболочка реактора (до 4 атм);
- (5) Промплощадка АЭС.

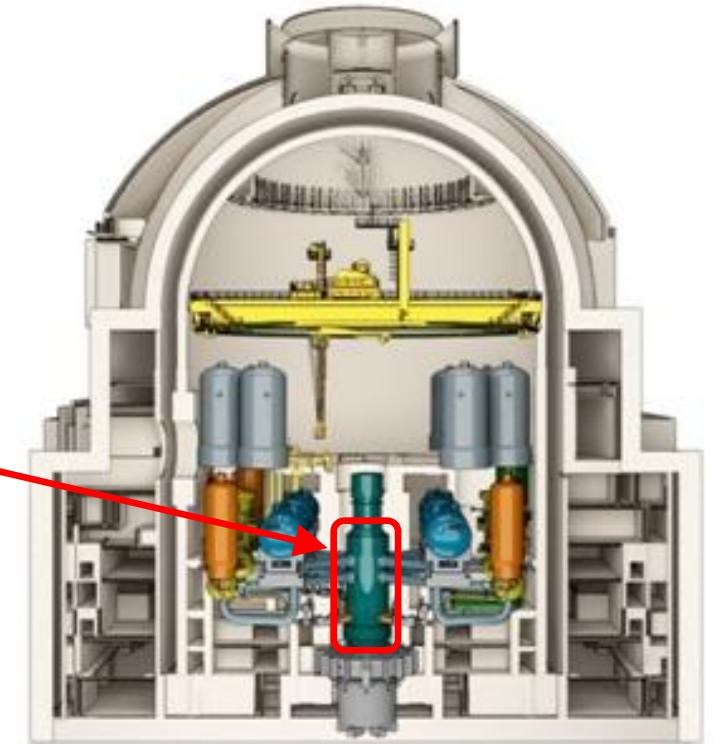
ТВС в а.з. : вид сверху



163 ТВС по 312 твэл

Защитная оболочка (ЗО) и промплощадка НВАЭС-2 с ВВЭР-1200 (макет)

Четвёртый (ЗО) и пятый барьеры безопасности – на случай аварийного выброса (~1 км)



Ядерный топливный цикл – что в совокупности производит АЭС ?

Отходы – продукт почти любого производства, равно как и доходы. И АЭС – не исключение.

Добыча урановой руды, очистка, обогащение ^{235}U :
- для почти всех ЯЭУ

В отличие от УВ топлива, в ядерном цикле нарабатываются новые делящиеся материалы – отходы можно пустить в доходы. Но ...

Фабрикация топлива
(в виде ТВЭЛ в ТВС)

*ЗЯТЦ: Замкнутый
Ядерный Топливный Цикл*

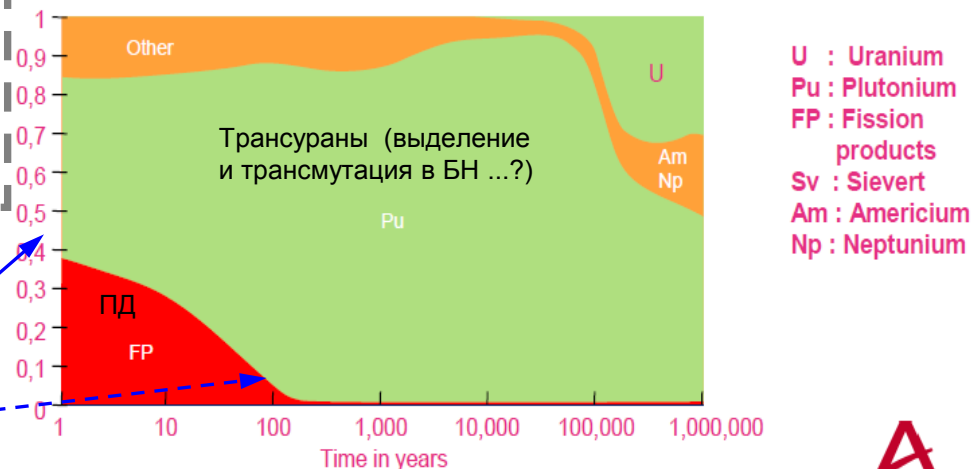
Производство на АЭС:
- электроэнергия
- сбросовое тепло
- ОЯТ (~40% ...) и др.

ОЯТ:
- Выдержка (на АЭС)
- Регенерация топлива
(U и наработанный Pu)

Регенерация отработанного ядерного топлива (ОЯТ) с отделением трансурановых элементов на порядки уменьшает активность остальных отходов. Но эти *миноритарные актиниды* тоже надо извлекать – в реакторах БН?

Отходы переработки:
- Выдержка (хранение)
- Глубокое захоронение

Spent fuel radiotoxicity by component



К вопросу об утилизации ОЯТ

Крупнейший в мире завод по переработке ОЯТ - La-Naug (Франция), способный перерабатывать ОЯТ от 90 энергоблоков – всё европейское топливо (цит. по Inet). Аналогичный в РФ - в г. Озёрск.



Но - пока мощностей в мире далеко не достаточно для переработки всего ОЯТ.

Реакторы-наработчики топлива (БН) только проектируются и строятся (работает – два, в РФ)

Научно-технические проблемы энергетической безопасности и безопасности ЯЭ:

- (1) Запасы делящегося урана-235 ($^{235}\text{U} = 0,72\% \text{ } ^{238}\text{U}$) обозримы ...
- (2) Обеспечение безопасности функционирования АЭС. Безопасность при авариях;
- (3) Проблема переработки и консервации отходов ОЯТ;

Решение проблем видится в :

- Реализация замкнутого (регенерация и воспроизводство) ядерного топливного цикла (ЗЯТЦ) с полным вовлечением ^{238}U и нейтрализацией отходов – гранд-задача на десятилетия – решаемая, но очень сложная;
- АЭС безопасны в высокой степени. Но от тяжёлых аварий нет абсолютной гарантии. Новые запросы диктуют новые требования к моделям и их основам.
- Разработка, постройка и анализ безопасности подземных хранилищ всех отходов ОЯТ – новый класс задач: от разного рода аналитических и численных моделей до подземных экспериментов, моделей, конструкторских проработок etc.

Аварийные события и тяжёлые аварии

- **Чем опасен остановленный реактор?**

Наработанные продукты деления (**ПД**) ядерного топлива нестабильны и излучают :

- ионизирующее излучение нарушает внутреннюю среду живых организмов;
- переход в тепло – нагревает и плавит: **ОТВ** (1% через 2ч после останова: ~30 МВт);

Барьеры безопасности гарантируют локализацию **ПД**. Потеря охлаждения зоны ведёт к тяжёлой аварии: тепло разрушает барьеры, **ПД** выходят в окружающую среду.

- **ОТВ и ПД – движущая сила и радиационные последствия тяжёлой аварии на АЭС (нереактивной);**
- **Стоит задача управления аварией – сохранения барьеров безопасности.**
Минимизация опасности требует её анализа.

Авария на ТМІ-2, США (29.03.1979) – совокупность отказов и чел. фактор

Исходное событие – отключение насоса охлаждения пара 2-го контура (конденсатный, "3 контур"). Далее:

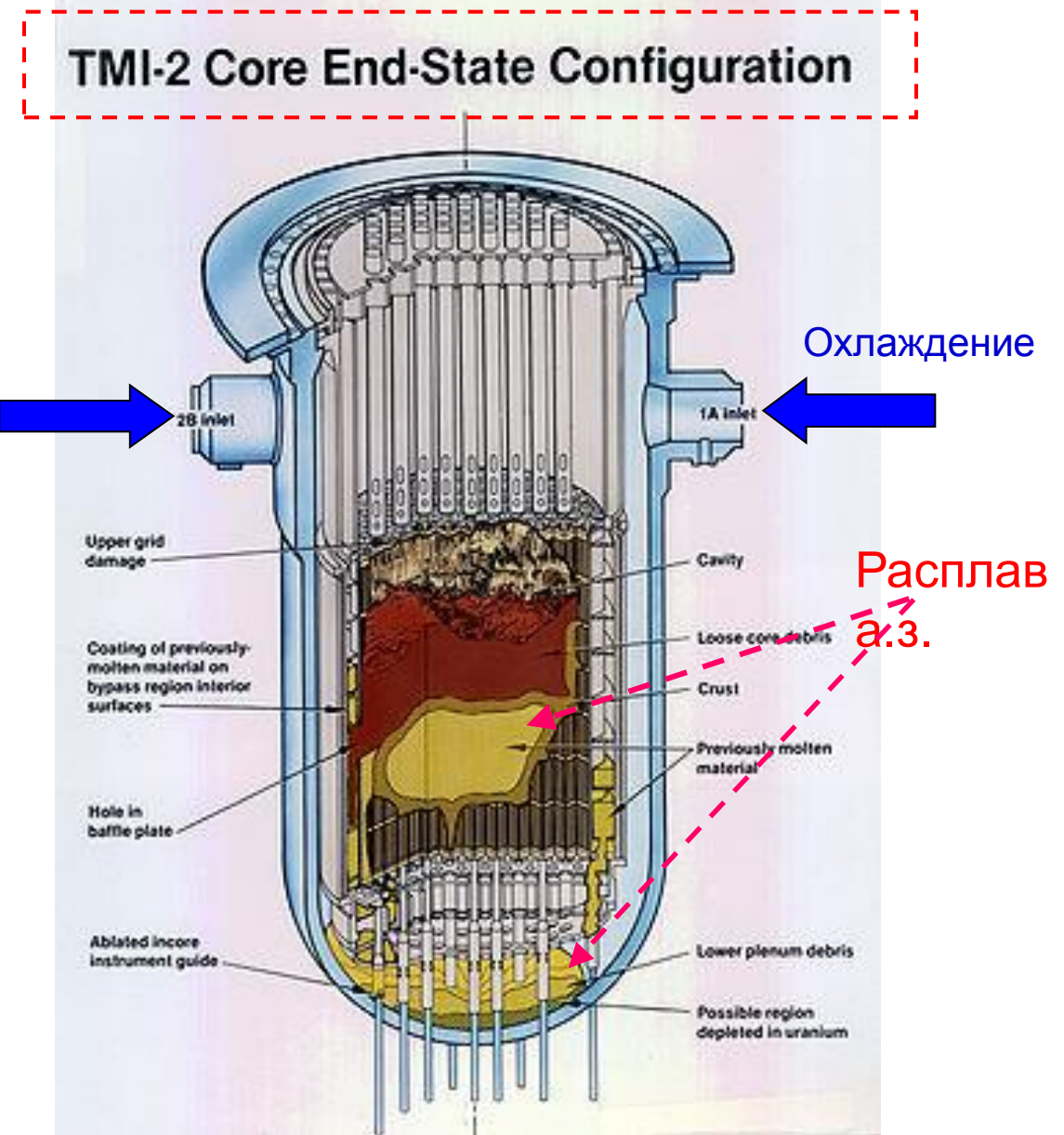
- Отключился питательный насос 2-го контура – отключ. турбины, останов реактора (2 мин);
- Запуск вспомогательных питательных насосов;

Запорные клапаны на линии подпитки 2-го контура оказались закрыты (халатность) :

- Вода не циркулирует в 2-м контуре и -
- 1-й контур плохо охлаждается, кипит – открыт клапан – не поняли – вода уходила из 1-го контура;

... В результате: Реактор на некоторое время остался почти без охлаждения. Осушение и плавление активной зоны, перемещение на днище корпуса ...

Первая в истории тяжёлая авария на большой АЭС – и самая лёгкая по последствиям. Причины: 2-3 отказа оборудования, чел. фактор – халатность и непонимание происходящего - до прихода спец-та.



Авария на ЧАЭС-IV (26.04.1986): ошибки персонала, недостаточный foolproof

Формальная причина: неудачный эксперимент по генерации энергии на выбеге турбогенераторов (для питания оборудования АЭС при заглушении реактора);

Обстоятельства – действия операторов ввели реактор в далеко не регламентный режим перед заглушением, почти все стержни защиты убраны (-тогда было возможно)

В 1:23 начали останавливать, но мощность возрастала;

В 1:23:40 – попытка ввести все стержни защиты, но вместо заглушения - рост реактивности, разогрев ...:

Неконтролируемый рост мощности в нижней части реактора за ~10 с. В результате -

Разрыв оболочек твэлов и фрагментация топлива (при выделении энергии, большей 1200 МДж/кг UO_2). Вскипание воды, **рост давления, разрыв каналов, разрушение реактора и помещения. Далее – горение графитовой кладки, вынос конвекцией ПД в атмосферу.**

Самая тяжёлая из возможных: реактивная авария, нет защитной оболочки, горение в атмосфере, ...



Всё же, АЭС работают надёжно – почему?

Меры контроля и управления при отказах, авариях и т.п.

- Реакторные измерения (флюенс, температура, кипение, датчики положения, ...). On-line обработка;
- Реакторная автоматика с резервированием – гарантированный останов реактора при сигнале (исключение разгона реактора до ядерно-теплового взрыва);
- Контроль и дублирование работы органов управления и др.;
- Пассивные системы залива а.з. водой (с замедлителем) после останова, работа активных систем теплоотвода от активной зоны, резервирование электроснабжения (дизель-генераторы);

Проектирование АЭС с учётом возможности, хотя и очень маловероятной, тяжёлой аварии:

- "Глубоко эшелонированная защита" на случай аварии – усиление роли естественных барьеров безопасности, поэтапно препятствующих выходу и распространению радионуклидов;
- Ряд систем безопасности при тяжёлых авариях (спринклеры, рекомбинаторы H_2 , СПОТ, УЛР, ...)

Регламентация действий персонала и постоянная работа с ним: переподготовка, учебные тревоги ("стресс-тесты АЭС"). Тренажёры *на базе компьютерных моделей аварий.*

И др.

Авария на АЭС Фукусима-1 (11.03.2011): стихийное бедствие + просчёты

Исходное событие:

Землетрясение магнитудой ~9 баллов (небывалое за 130 лет наблюдений) - 14:46

Разрушение землетрясением электрических сетей на северо-восточном побережье.

14:48. Все реакторы заглушены, запуск дизель генераторов – охлаждение зоны;

15:41. Подошедшая волна цунами заливает территорию АЭС. Проектная высота волны цунами: до 6,8 м. По факту высота 10-13 м;

Затопление дизель-генераторов – не работают насосы: нет охлаждения зоны;
Сценарий аварии: полное обесточивание (SBO).

Плавление активной зоны, генерация и выход водорода. Взрывы. Выход активности в окр. среду. Но гораздо меньше, чем на ЧАЭС, и много – в сторону моря.



Ущерб экономике - в основном от землетрясения. Но внимание – к аварии на АЭС, которой сопутствовал ряд плохих обстоятельств. Все 6 блоков АЭС выдержали само землетрясение, но потом - все АЭС Японии закрыли

Комментарий: что ещё заставляет ядерную энергетику быть самой безопасной?

См. А.А. Саркисов: Феномен восприятия общественным сознанием опасности, связанной с ядерной энергетикой. Вестник Российской академии наук, **82**, 1, 2012

Термин «техногенная катастрофа» давно и прочно вошёл в реестр глобальных опасностей человечеству. Причина – в росте энерговооружённости: недостатки суть продолжение достоинств. «Анализ рисков» – необходимый этап разработки источника энергии. Тем не менее: «Изучение общественного мнения, а также реакция населения ... убеждают в том, что приемлемый уровень безопасности – это скорее ощущение, ..., чем осознанная рациональная категория.» И специалисту очевидно, что « ... восприятие опасности атомной энергетики гипертрофировано ...».

ТА АЭС Фукусима – только один из множества примеров, но самый наглядный.

Общий ущерб от небывалого землетрясения –

- более 27 тыс. погибших и пропавших без вести;
- множественные разрушения в десятках городов;
- более 200 млрд на восстановление;

Ущерб от тяжёлой аварии на АЭС –

- 2 (двое) погибших и 11 – получили ранения;
- разрушено 3 старых блока (три осталось, но ...);
- около 25+10 млрд на компенсацию ущерба;

Тем не менее, основные обсуждения в 2011 и последующие гг. – степени радиационного загрязнения (относительно малая ...) и причин аварии (хотя общая – просто затопление АЭС и неготовность к этому)

Таким образом, ЯЭ находится «под колпаком» её восприятия. Взвешенный анализ требует знаний.

Общие цели анализа и моделирования тяжёлых аварий (ТА)

Такие аварии маловероятны, но возможны. В этом случае необходимо:

- противодействовать развитию аварийных событий к тяжёлой фазе аварии;
- минимизировать последствия ТА – остановить её развитие, локализовать источник радиации.

Готовность к этому включает понимание ситуации, системы безопасности и обученный персонал.

Для обеспечения готовности требуется *изучение аварий*, в основном это моделирование.

Деятельность по моделированию ТА имеет цели:

- (1) **"Физическая"** – анализ протекания ТА и разработка мер безопасности;
- (2) **"Бюрократическая"** – демонстрация эффективности мер безопасности при ТА.

1-я цель – разработка расчётных средств: оптимизация систем безопасности АЭС, тренажёры для операторов, данные для технических кризисных центров: быстрое и адекватное реагирование;

2-я цель – органы надзора: выдача лицензии на строительство; разрешения на модернизацию, продление лицензии на работающие АЭС – *на основе аналитико-расчётного обоснования*.

Декларация достаточной безопасности данного блока АЭС при авариях основана на результатах их расчётного моделирования, включая анализ радиационной обстановки.

АНАЛИЗ АВАРИЙНЫХ СОБЫТИЙ: Пространственный масштаб определяет физ. процессы, цели и методы исследования

Масштаб АЭС: ~ 50 м – всё внутри 30 :

- масштаб реактора: ~ 1-5 м
- структура активной зоны: ~ 1-10 см
- структура топливного стержня: 0,1-1 см
- структура топлива: 0,001-0,01 мм

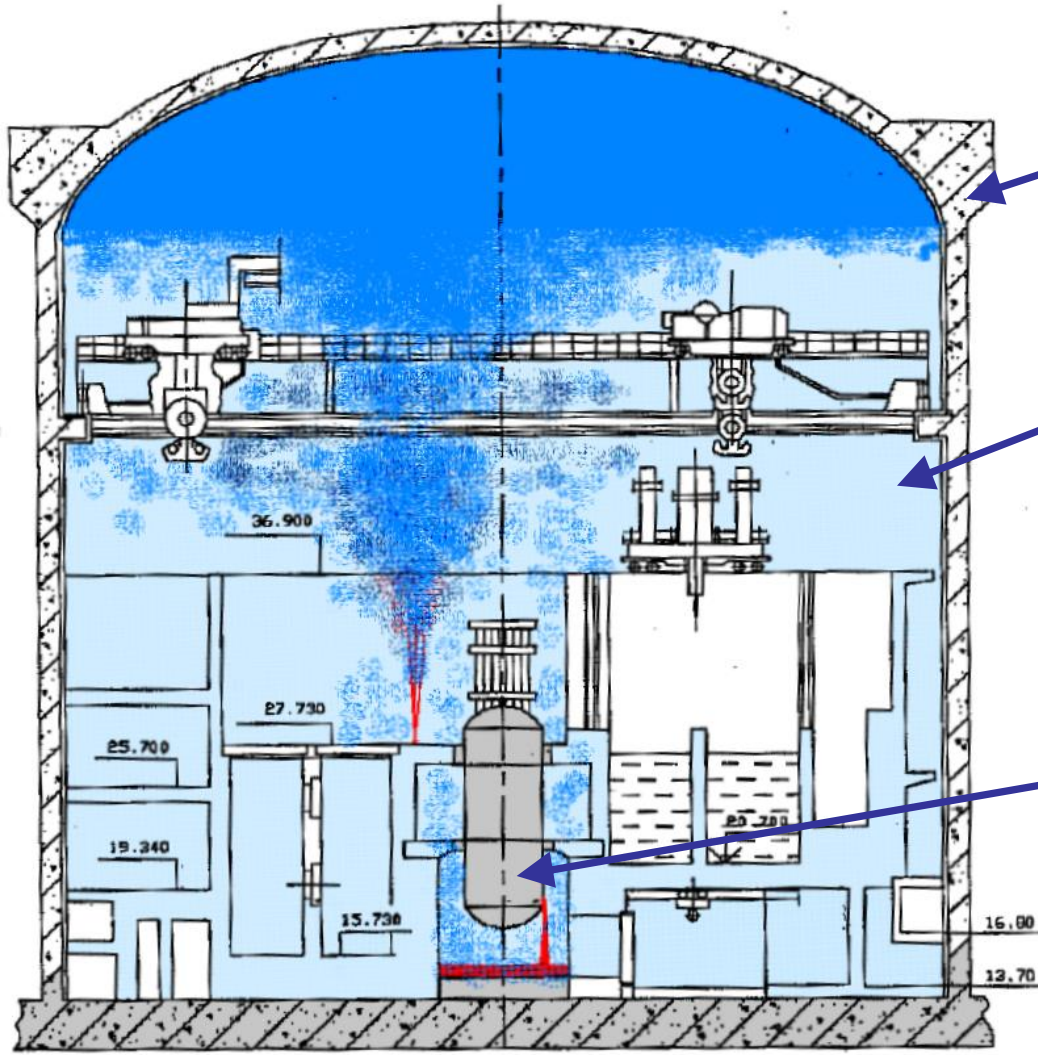
Анализ физ. состояния АЭС и целостности *барьеров безопасности* (относительно выхода активности)

В сторону увеличения – вне 30 :

- Промплощадка (территория АЭС): < 1 км
- Зона отселения: ~ 5 км
- Далее – по постановке задачи ...

Анализ радиационных последствий

АЭС как физическая система (аварийный режим) и необходимые области знания



Защитная оболочка:
Механика ДТТ

Атмосфера под 3О:
**гидродинамика,
теплофизика**

Реактор и первый контур:
"мультифизика" :
**Ядерная Ф., нейтроника,
ФТТ, термодинамика,
физика/механика
сплошной среды ...**

Второй контур:
**гидродинамика,
теплофизика, ...**

Моделирование:

Работа реакторной
автоматики, отказы;

Аварийные процессы
(разрушение
барьеров
безопасности);

Распространения ПД
внутри АЭС и выход
за пределы.

Реализация:

Численные методы,
статистика,
программирование,
сопровождение ...

АЭС с PWR

Авария и взаимодействие расплав-бетон: **теплофизика, физ. химия ...**

Проблемы комплексного моделирования (внутри АЭС)

- Сложная геометрия;
 - Многомасштабность по времени (секунды-годы) и пространству (от зёрна поликристалла ~ 1 Мкм - до защитной оболочки ~ 50 м);
 - Большое количество физических процессов, нестационарных, изучаемых –
 - Нейтронная физика (ЯФ и численные методы);
 - Поведение топлива различных составов (ФТТ, химия ...);
 - Гидродинамика течений в контурах (численные методы);
 - Термомеханика конструкций РУ и ЗО (МДТТ, численные методы);
 - Перенос продуктов деления по контурам и в ЗО (физика аэрозолей, ...);
 - Разрушение активной зоны, образование/расширение расплава: "мультифизика";
 - Гидродинамика смеси пара, водорода и др. в пределах защитной оболочки (CFD);
 - Работа систем безопасности (теплофизика, гидродинамика; CFD);
- Etc.

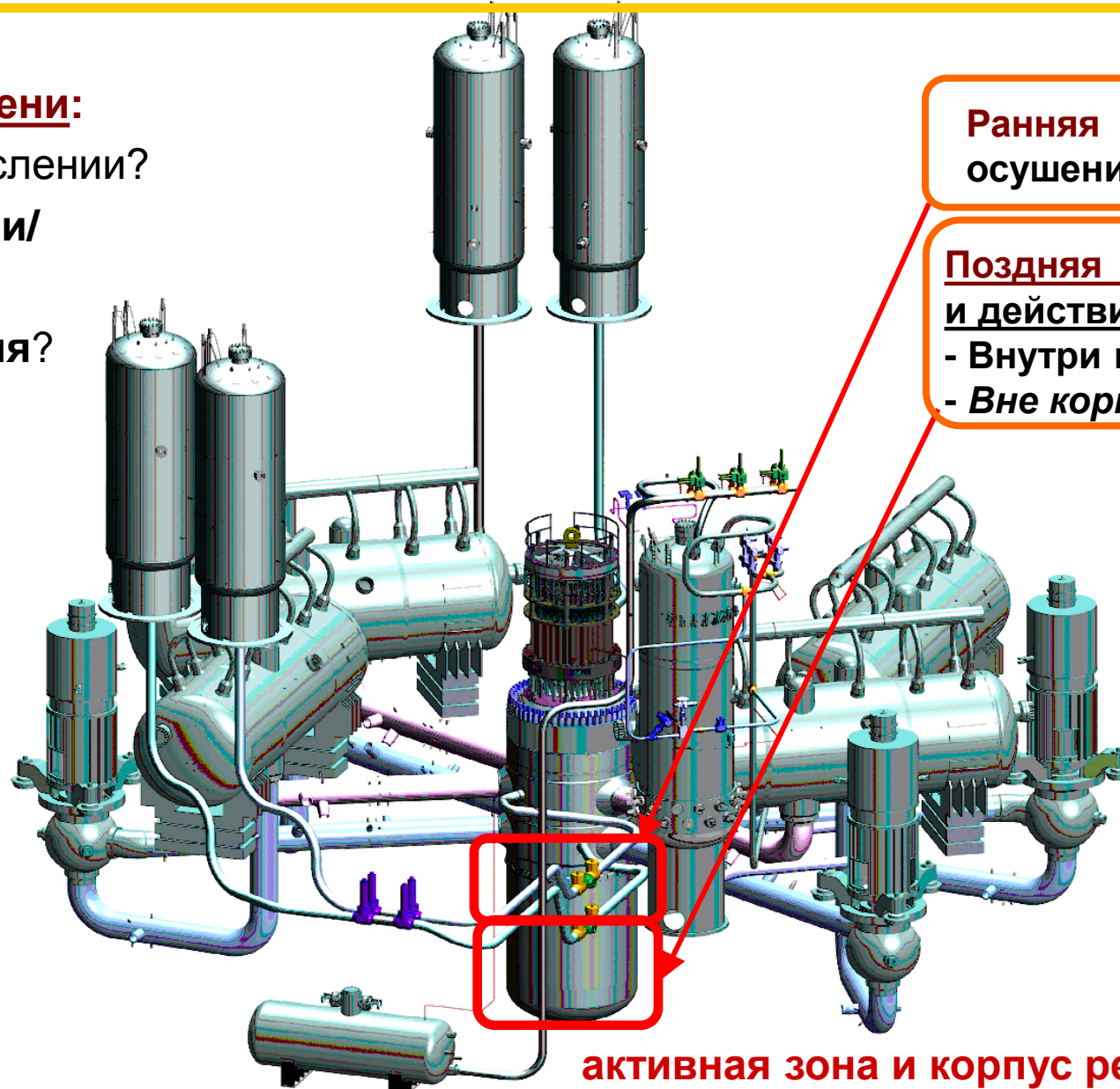
При моделировании выделяется несколько пространственных масштабов. Способ моделирования определяется процессами задачей. Результат: модель и алгоритм

(0) Моделируемые: системы, фазы развития и последствия тяж. аварии

Надо рассчитать во времени:

- Выход водорода при окислении?
- Возможность локализации/стабилизации расплава?
- Выход продуктов деления?

Уровень (0):
Весь 1-й контур,
пространство
внутри защитной
оболочки



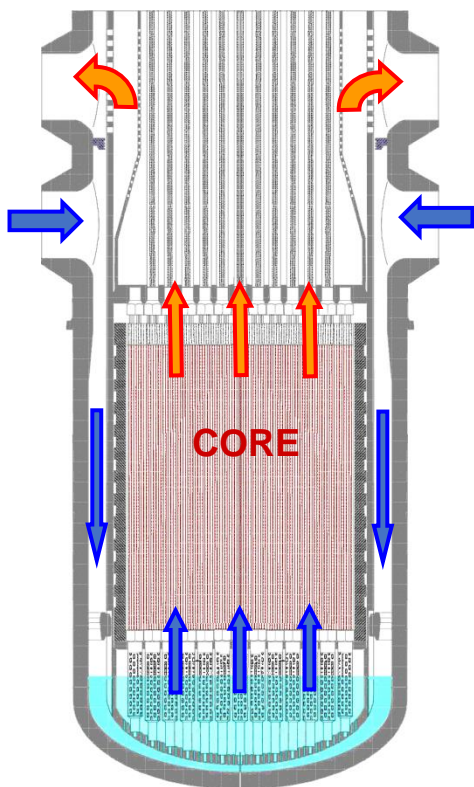
**Ранняя фаза –
осушение зоны**

**Поздняя фаза – плавление
и действие расплава:**
- Внутри корпуса
- *Вне корпуса*

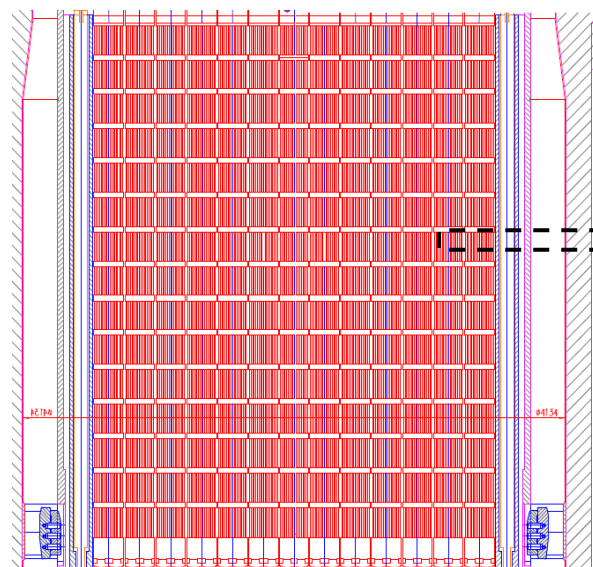
активная зона и корпус реактора

(1) Реактор, зона, ТВЭЛ : от макро- к мезо-масштабу

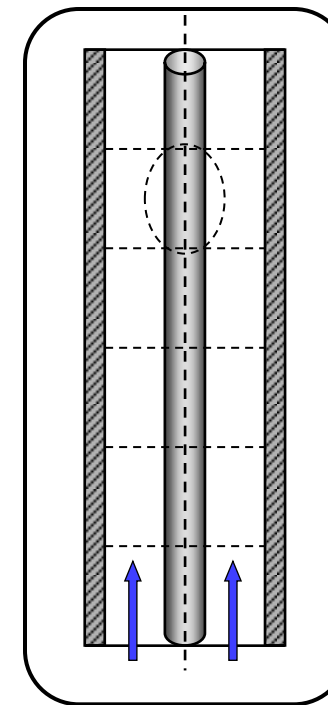
Весь реактор



Расчёт процессов в активной зоне

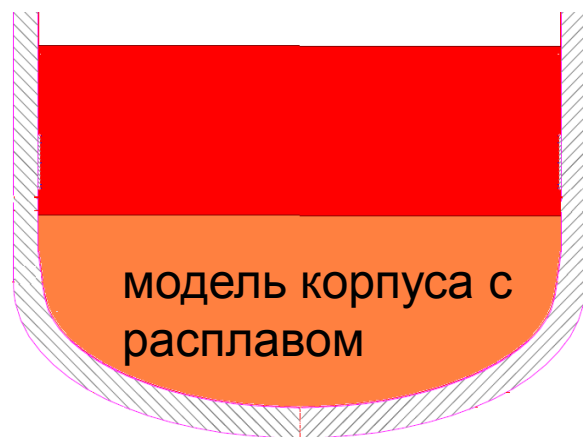


Процессы в представительных ТВЭлах



модель активной зоны

Разрушение а.з.?

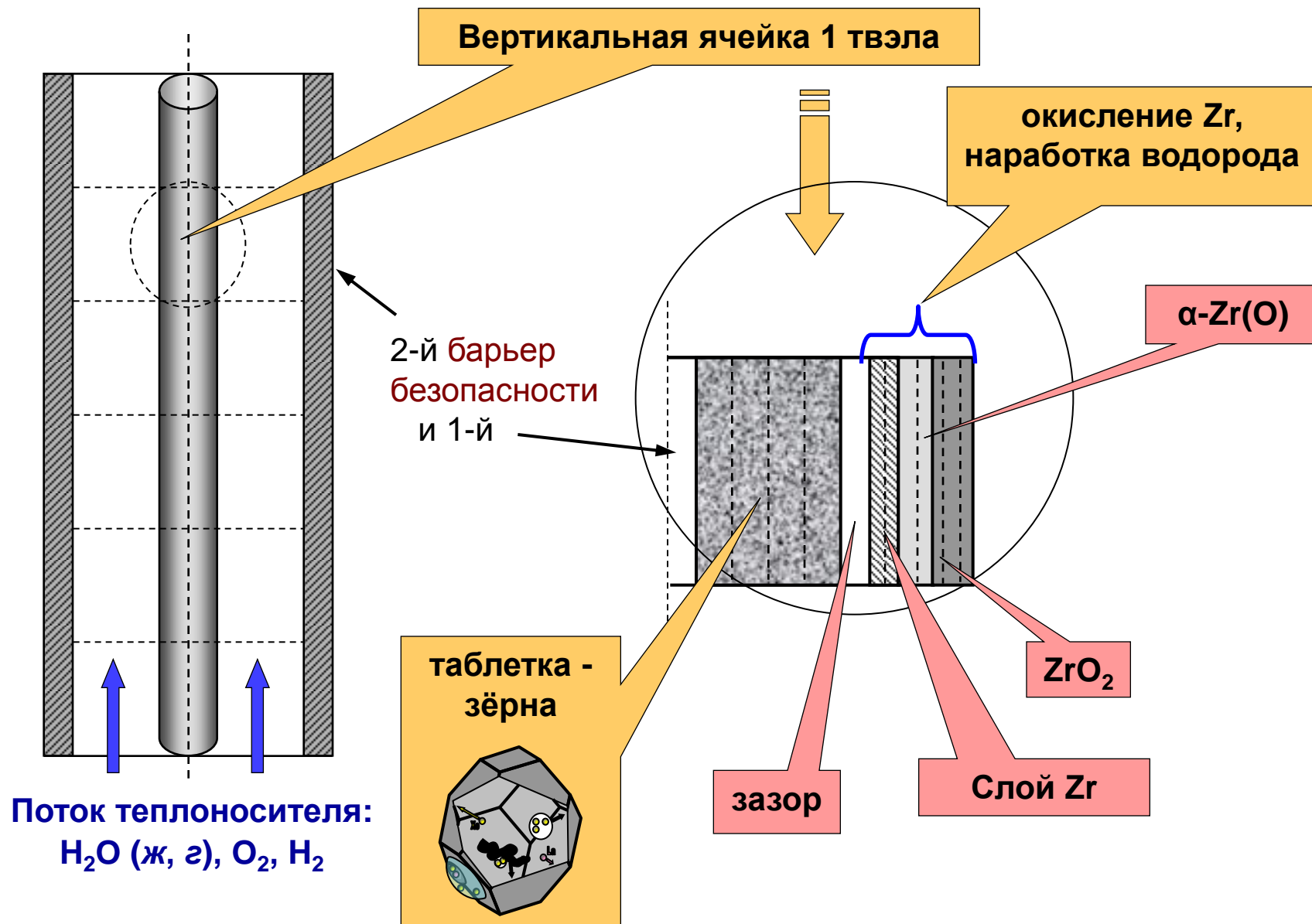


Расчёт процессов в нижней части корпуса:

- Расслоённый расплав на днище;
- Состояние корпуса реактора.

Расчёт происходящего на меньших масштабах – это гран. условия и источник в расчётах на больших

(2) Топливо и ТВЭЛ: от мезомасштаба – к микромасштабу



Тепло- и массообмен (диффузия) в топливе и циркониевой оболочке:

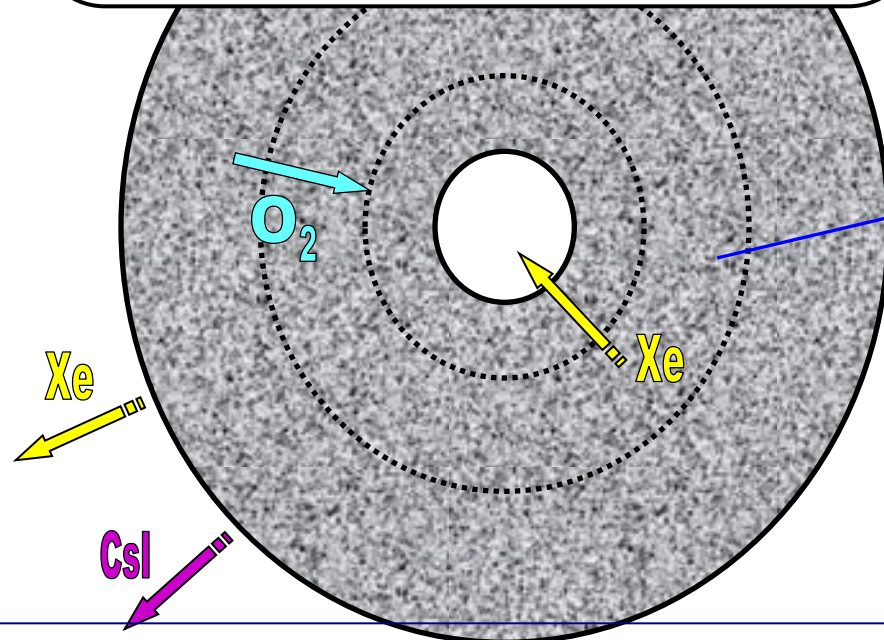
- выход ПД из топливной таблетки в газовый зазор;
- окисление оболочки паром, генерация водорода;
- прочность и время разрушения частично окисленной оболочки;
- плавление оболочки, затем топлива;
- образование расплава: кориум;

Результат: выход водорода, состав расплава в корпусе, состав выходящих ПД (активность) – факторы разрушения и загрязнения;

(3) Топливная таблетка: модели микромасштаба

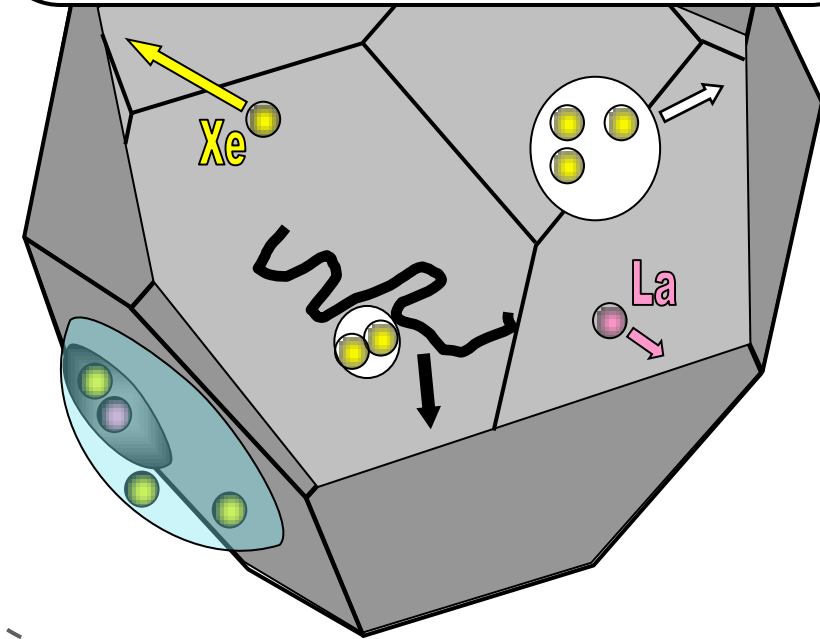
Мезомасштаб: таблетка UO_2 (~1 см)

- **продукты деления:** межзеренный транспорт и выход в открытые поры
- **окисление топлива и ПД:** диффузия кислорода по таблетке



Микромасштаб: зерно UO_2 (~10 мкм)

- **продукты деления:** 18 химических классов, ~ 200 изотопов, ~100 химических соединений
- **внутризеренные дефекты:** вакансии, межузлия и их кластеры, дислокации, поры, пузыри
- **межзеренные объекты:** пузыри, сеть каналов, твердотельные преципитаты



Результат: микросостояния сворачиваются в интегральное состояние таблетки и представительного ТВЭЛА

- Строятся сценарии событий: причины, вероятный ход событий, логика управления и др.
- Математические модели физических явлений: уравнения сплошной среды (0D-3D) и другой физики. Сопряжённое численное решение уравнений – программа для ЭВМ;
- Программа состоит из связанных модулей: рассчитывают свои группы явлений;
- Верификация (валидация): Проверка результатов по аналитическим тестам, экспериментам и расчётам известных аварийных событий (TMI-2, Fukushima);
- Из-за недостатка экспериментов: иерархический принцип построения описания (контроль более простых подходов по результатам с более точными моделями);

-
- Выделение и ранжирование существенных событий – PIRT analysis : **знаем, что нужно учесть**;
 - «Равноточность» подходов и моделей процессов (размерность и детализация, решаемые уравнения, способы аппроксимации) : **знаем, что не нужно учитывать и делать**;
 - Исследование чувствительности и анализ неопределённостей : **знаем, что, и как проверить**;
 - Для этого необходима – вычислительная эффективность ПС : **знаем, как получить нужный результат за нужное время.**

Расчётные средства (РФ) моделирования нормальных и аварийных режимов

СОКРАТ – штатное средство оценки безопасности при ТА для АС с ВВЭР.

СОКРАТ БН – аналог для реакторов на быстрых нейтронах.

Следующее поколение расчётных средств:

ЕВКЛИД V2 – аналог для всех РУ с жидкометаллическим теплоносителем.

«Виртуальная АЭС с ВВЭР» – выход на новый уровень расчётных возможностей

Разработки с
головным
участием
ИБРАЭ РАН

Мировые аналоги: ASTEC (OECD/NEA), MAAP (...), MELCOR (US NRC). Другие – по странам ...

Начинают применяться – 3D CFD методы (вычислительная гидродинамика)

Основы количественного описания (моделирование протекания аварии внутри АЭС):

• **Физические модели поведения вещества («точечные»):**

ядерно-физические, физико-химические (термодинамика, кинетика в сопряжении с прочим);

• **Механика сплошной среды и теплоперенос («распределённые» модели):**

- Многофазная механика жидкости и газа (0D-1D-2D-3D) в сложных средах;

- Механика деформируемого твёрдого тела (2D-3D), элементы ФТТ;

• **Численные методы и вычислительные системы. Практическая мат. статистика:**

- МКЭ, МКО, вычислительная линейная алгебра, параллелизация...

Иллюстрации к некоторым расчётам аварийных событий (сценарии аварий водо-водяного реактора с переходом в тяжёлую фазу)

Основные цели таких расчётов (необходимы для пуска новых и продления срока службы существующих АЭС):

- Оценка возможных последствий, их вероятностей – для принятия решений;
- Оценка возможностей управлять событиями;
- В итоге – гарантии безопасности при тяжёлых авариях.

Средства: мультифизические программные комплексы (см. выше)

Проблемы: Точность прогнозов существующего пока недостаточна, (сложности физики происходящего). Необходимы модели и методы для новых проектов АЭС (УТС ...), для смежных областей (переработка ОЯТ, ЗЯТЦ etc.)

Проектный расчёт: поддержка концепции «Течь-перед-разрушением» (ТПР)

Трубопроводы водо-водяного реактора изготовлены из прочных сталей. Одно из слагаемых прочности – минимизация хрупкого разрушения: мгновенный роста малого дефекта под нагрузкой невозможен. Вследствие этого сквозную трещину в трубе можно обнаружить по утечке теплоносителя и сразу принять меры. Или – подождать, если трещина мала относительно предельно допустимого размера. Вероятно, некоторые АЭС во Франции в 2022 г. были остановлены в самый «горячий» момент именно по таким причинам: трещина, стресс-коррозия, недостаточный оцениваемый запас прочности.

Оценка предела роста трещины, т.е. времени перехода к быстрому разрушению – основа концепции ТПР. Оценки делаются по приближённым методикам, опирающимся на эксперименты и прецизионные численные расчёты. Простой пример такого расчёта – ниже.

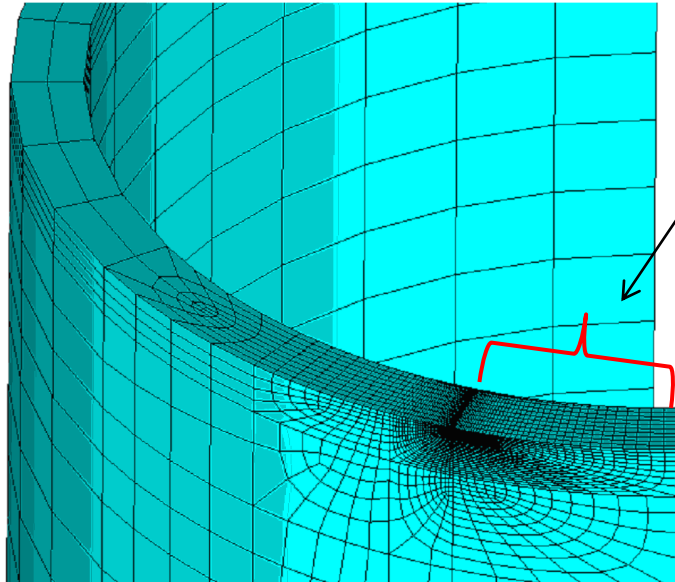
Дано: течь в трубопроводе данных характеристик, нагруженном внутренним давлением и изгибающим моментом, провоцирующим растяжение и рост дефекта до разрушения.

Требуется :

- оценить по утечке размер трещины и скорость её роста – а) путём прямого численного 3D моделирования; б) применением полуэмпирических зависимостей;
- дать оценку применимости упрощённых подходов (в приведённом примере).

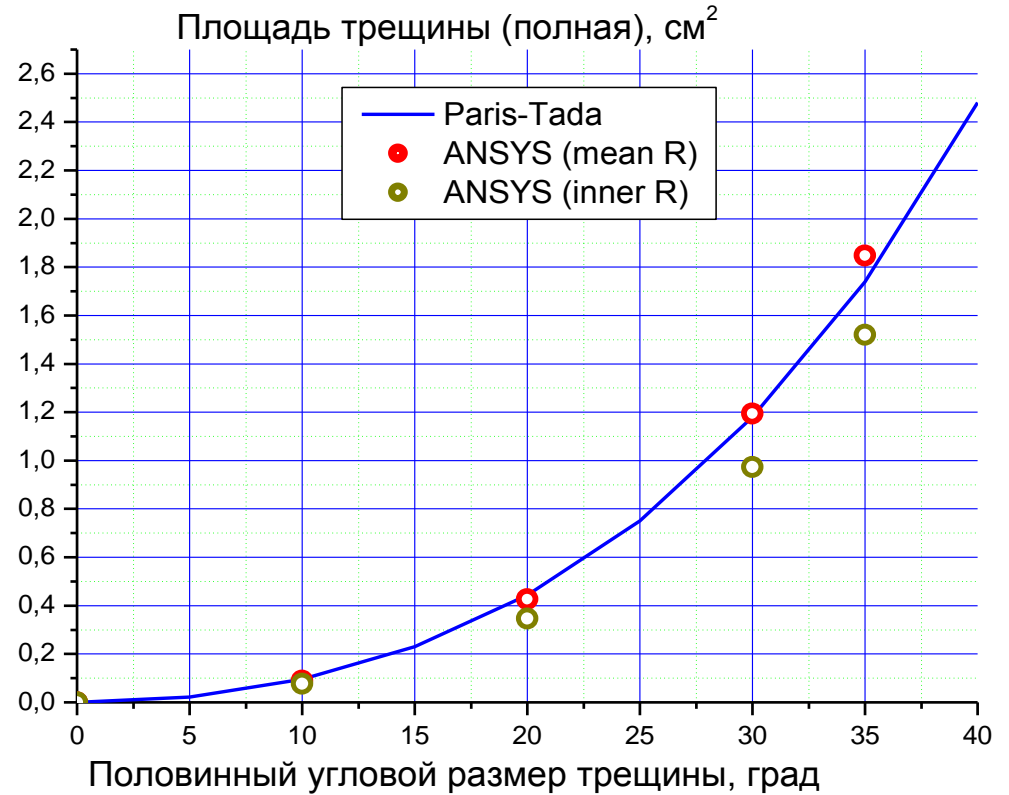
Стандартная задача. Методология – 1990-е гг. Но её применение требует квалификации ...

Расчёт в поддержку концепции «Течь-перед-разрушением» (ТПР) – иллюстрации

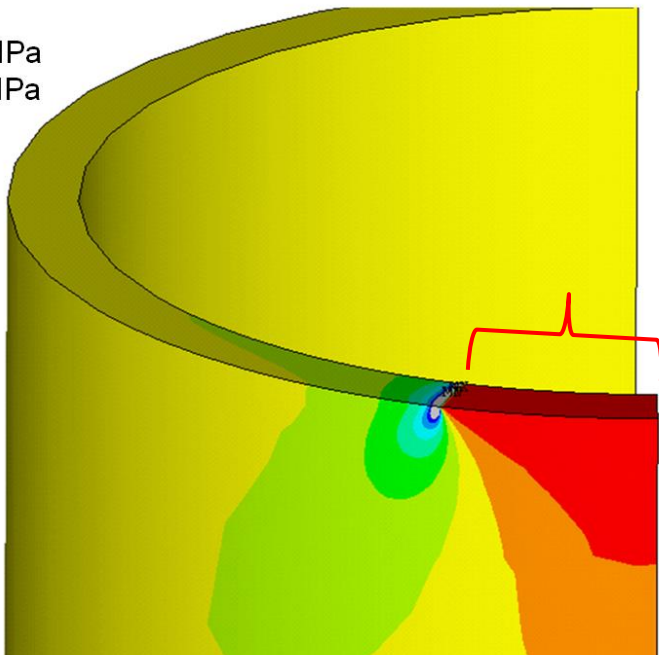


Трещина в трубе (1/4).
Расчёт методом
конечных элементов
(ANSYS):

- генерация сеточной модели;
- задание данных;
- варианты расчёты;
- обработка и анализ.



σ_{zz} :
min= - 886 MPa
max= 68 MPa



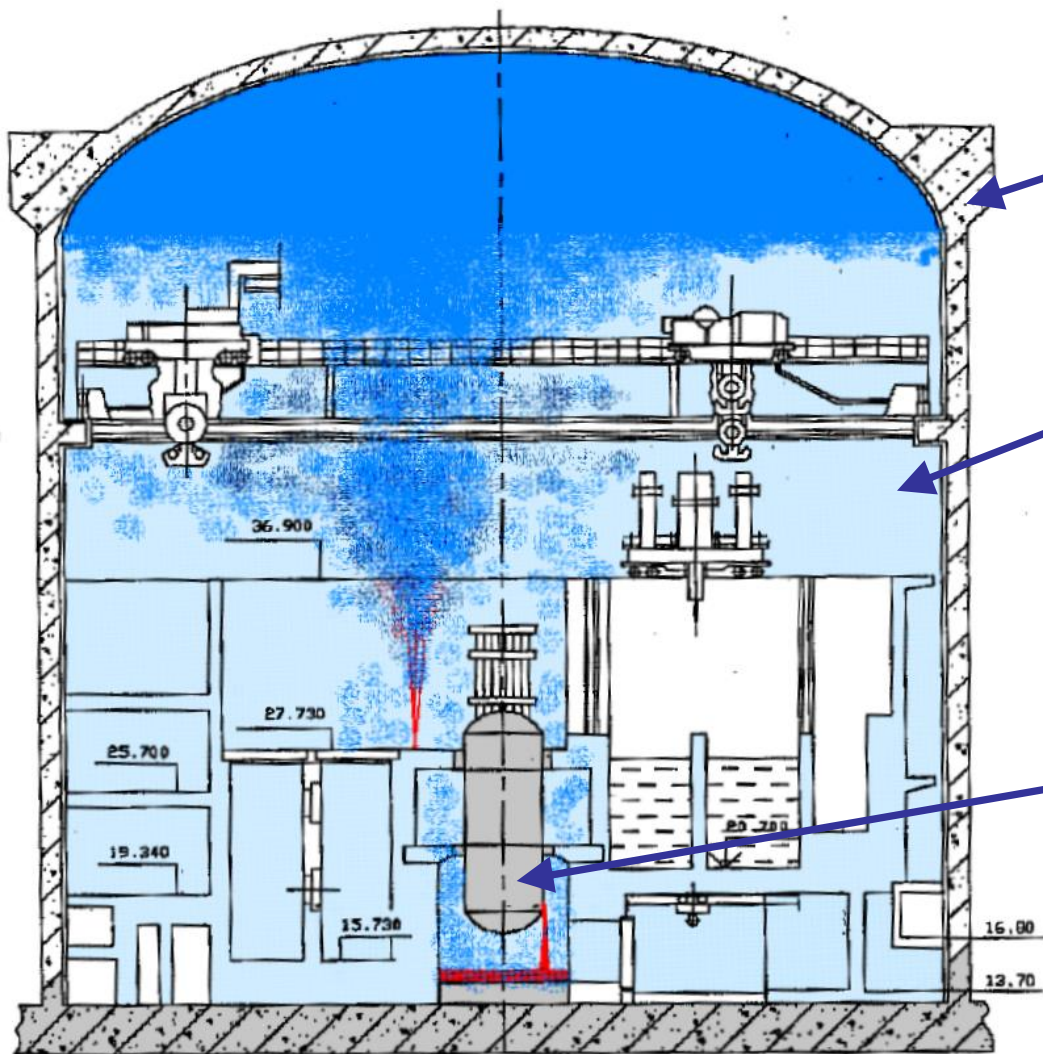
Основной результат – площадь сечения трещины в зависимости от размера. Это связывает расход теплоносителя с размером.

Сравнение с эмпирикой в серии с разными размерами трещины показало, что совпадение неплохое.

Для простых конфигураций возможна оценка по формуле.

Соответствующая программа была разработана в ИБРАЭ РАН.

Запроектные тяжёлые аварии: общие модели АЭС (напоминание)



Защитная оболочка:
Механика ДТТ

Атмосфера под 3О:
**гидродинамика,
теплофизика**

Реактор и первый контур:
"мультифизика" :
**Ядерная Ф., нейтроника,
ФТТ, термодинамика,
физика/механика
сплошной среды ...**

Второй контур:
**гидродинамика,
теплофизика, ...**

Модели работы
реакторной
автоматики
(логика);

Физические модели
аварийных
процессов;

Физические модели
распространения
ПД в системах АЭС
и вне её.

Численные методы,
статистика,
программирование,
сопровождение ...

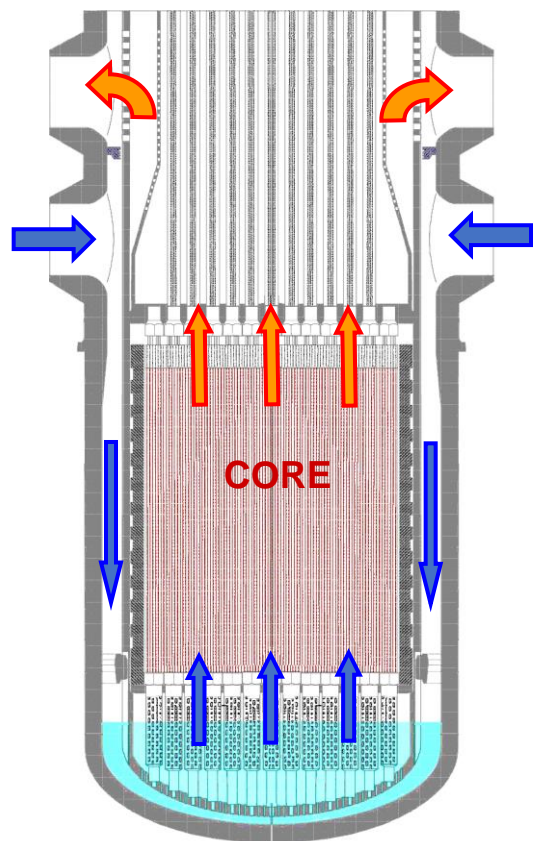
АЭС с PWR

Авария и взаимодействие расплав-бетон: **теплофизика, физ. химия ...**

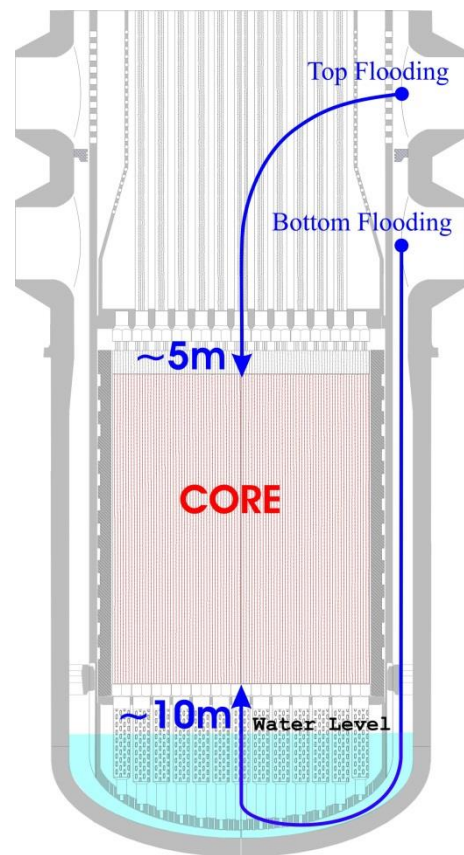
Эволюция от ранней – к поздней стадии аварии, состояние корпуса (ВВЭР)

LOCA: ... плавление зоны – стекание – расплав на днище корпуса

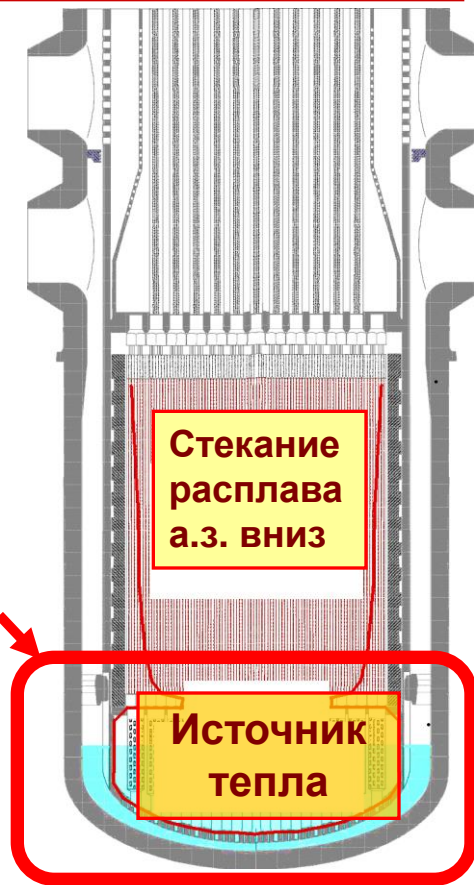
Нормальные усл-я



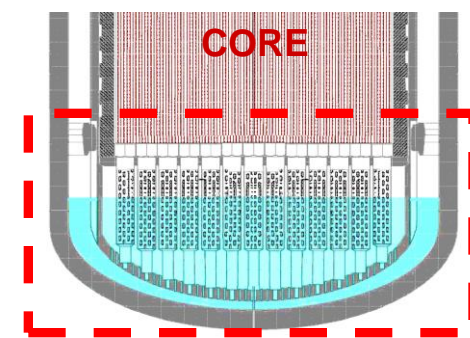
Ранняя стадия: охлаждение



Поздняя стадия

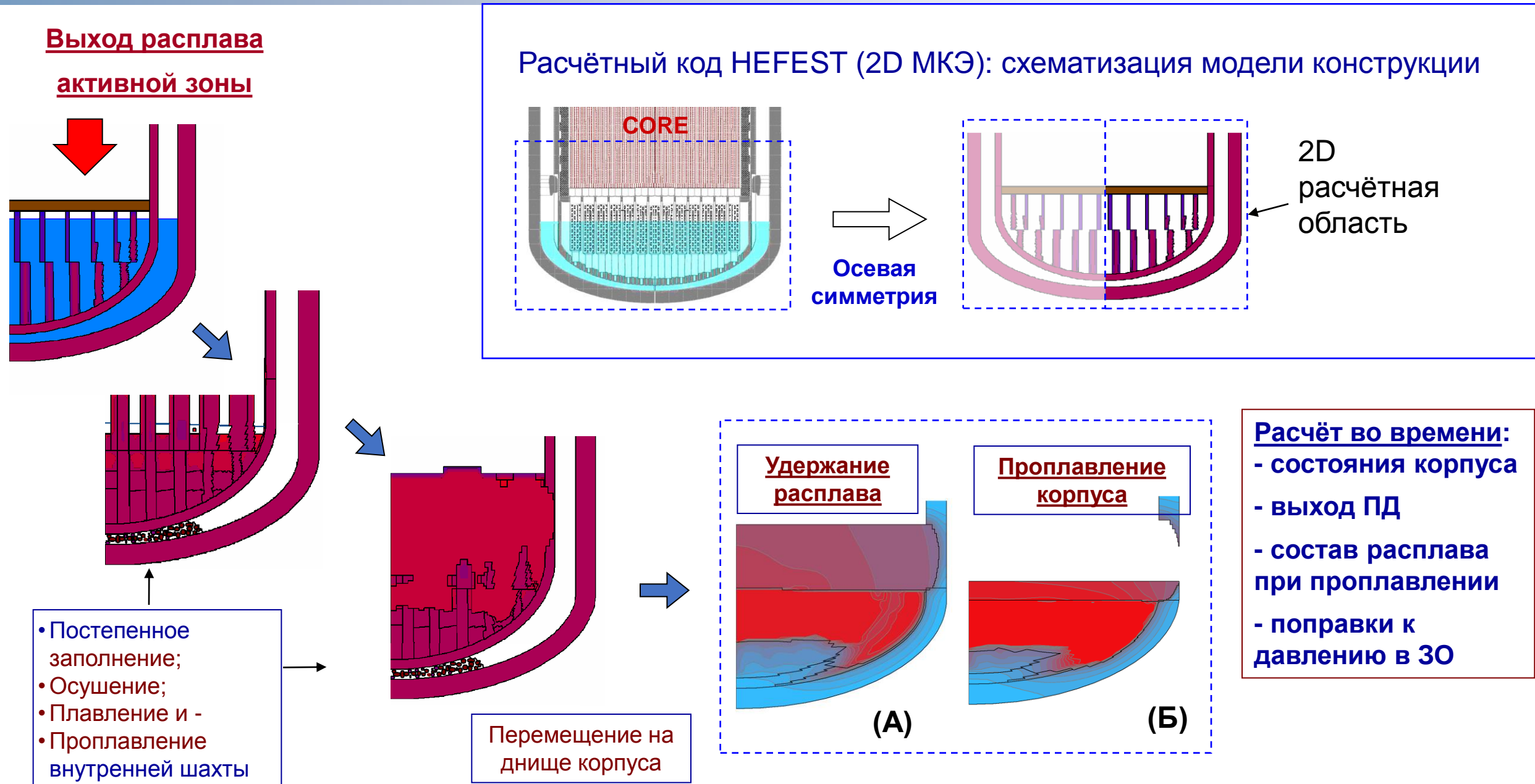


Здесь - максимум нагрузки на корпус



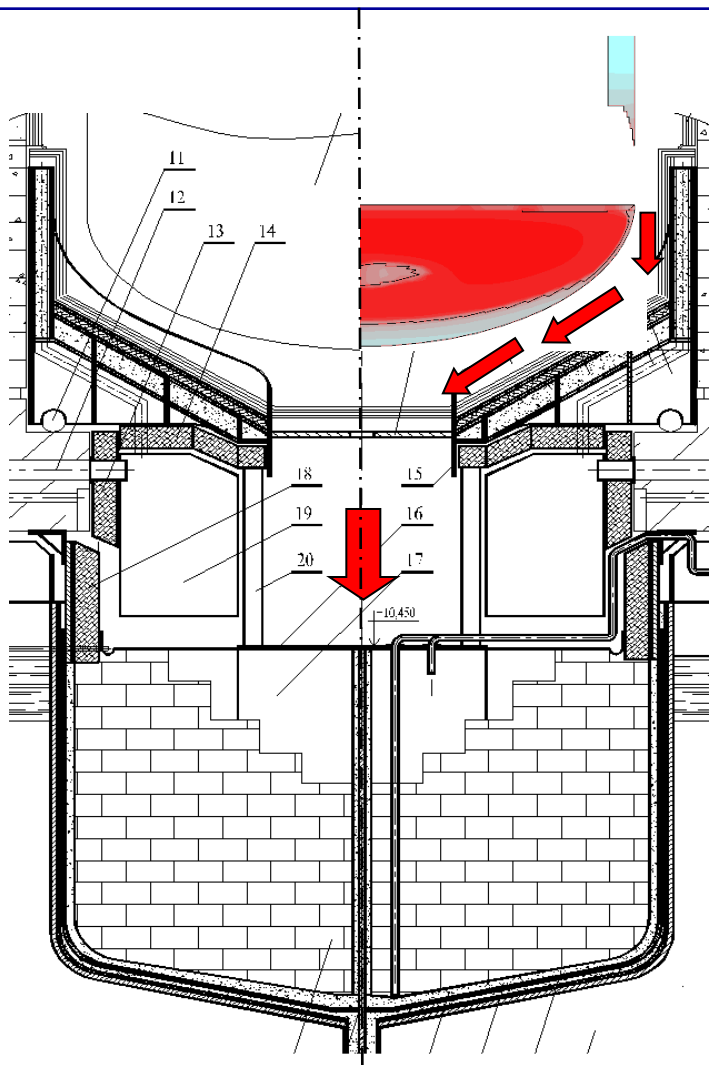
Моделируемая подобласть

Развитие аварийных событий в нижней части реактора. Состояние корпуса



Дальше: почему реакторы ВВЭР – уже почти IV-го поколения (Gen III+) ?

Расплав локализован в спец. устройстве: УЛР

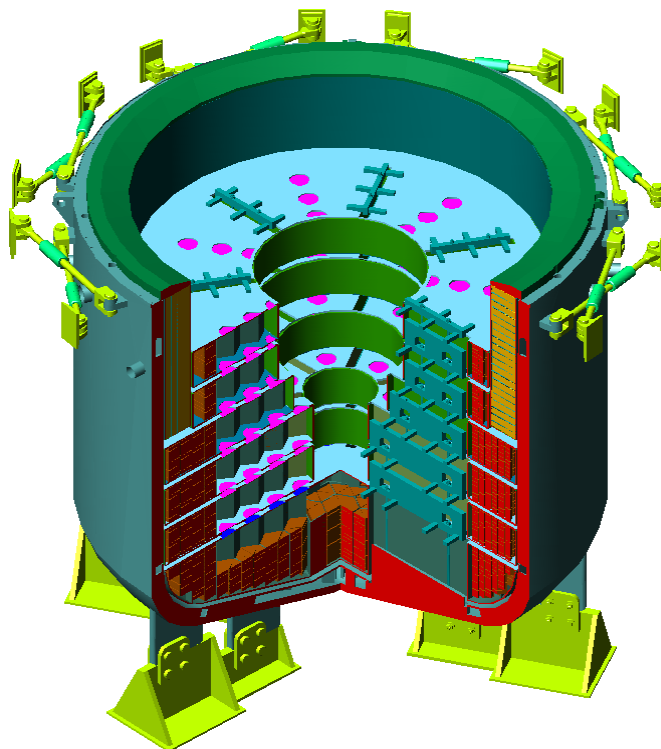


УЛР АЭС с ВВЭР-1000

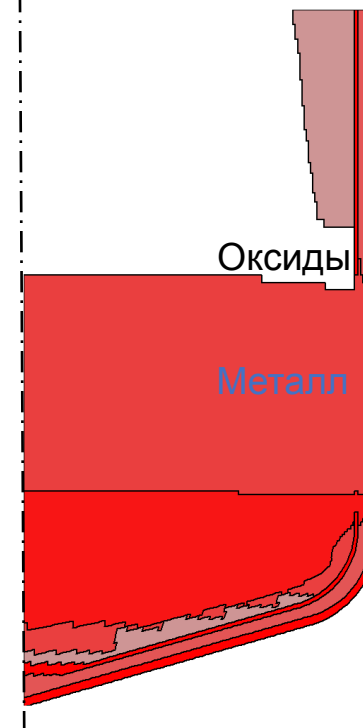
Квазистационарное состояние расплава в УЛР

- жертвенный материал растворён в расплаве
- инверсно расслоённый расплав
- вода над расплавом и внешнее охлаждение:
- всё ОТВ снимается теплоносителем

УЛР АЭС с ВВЭР-1200

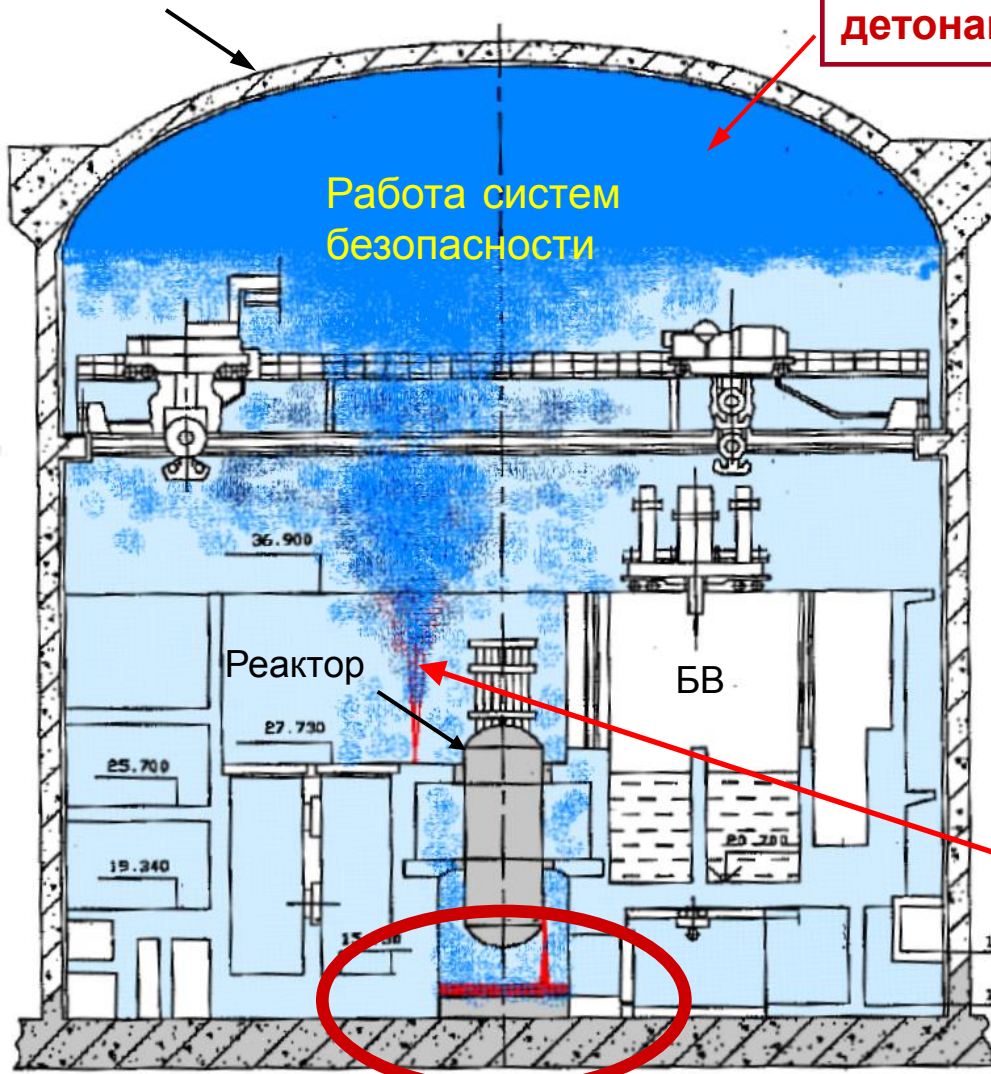


Расчётное состояние расплава



Дальнейшие события в атмосфере защитной оболочки (ЗО) – без УЛР !

Защитная оболочка: ЗО



Работа систем безопасности

**Водород: воспламенение (4 %мол.) - ?
детонация (8-10%) - ? Разрушение ЗО - ?**

- Исходные события (течь, SBO) вызывают нарушения и разрушения;
- Водород – из воды: реакция пара с цирконием оболочек твэлов:
$$\text{Zr} + 2\text{H}_2\text{O} = \text{ZrO}_2 + 2\text{H}_2 + 600 \text{ МДж/кг Zr}$$

Через течь выходит в пространство ЗО
- Воспламенение водорода – рост давления, возможны трещины в защитной оболочке.
- Пар ингибирует горение – но это надо рассчитывать – сложная 3D CFD задача

Вместе с паром выходят водород и радиоактивные ПД – продукты деления: изотопы газов, аэрозоли

АЭС с PWR

Радиоактивный тепловыделяющий расплав

Аварийное событие: выход пара и водорода под ЗО (открытие клапана)

Варианты построения расчётной области

Компромисс между минимизацией ресурсов и требованиями к детализации

Расчёт во времени:

- состав атмосферы;
- температура;
- давление;
- температура стен;
- действие систем безопасности.

Результат:

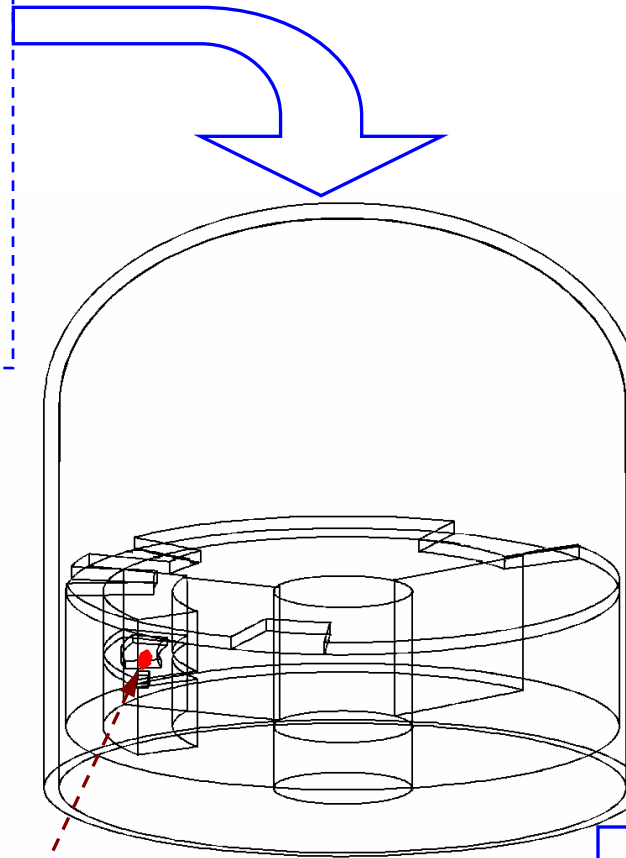
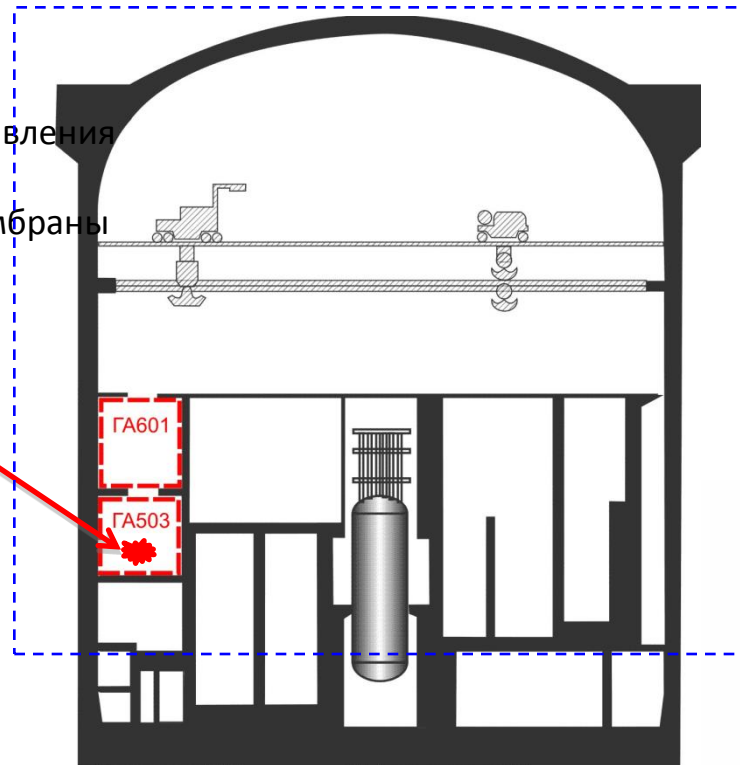
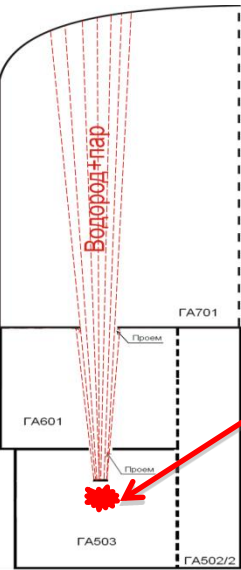
- анализ состояния;
- оптимизация систем безопасности.

Проведение расчётов ...

Источник

$h \approx 50 \text{ м}$

Эффект управления аварией (разрыв мембраны барботера)

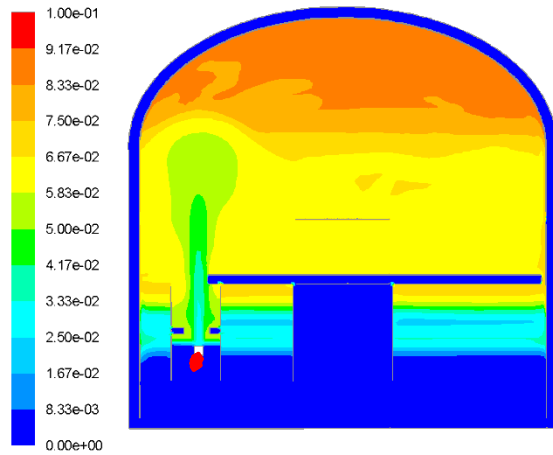


Проблемы и решения:

- Анализ вероятных событий: «сценарий»;
- Возможности упрощения. Модель процесса;
- Расчёты нагрузок. Проверки;
- Доработки, уточнения или – новые модели.

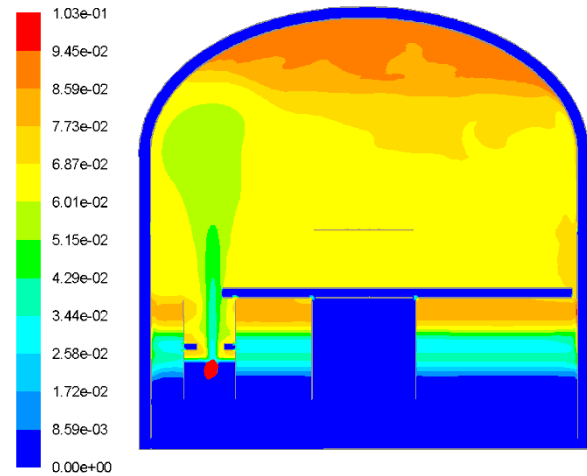
Выход пара и водорода в аппаратный зал АЭС и их распределение

Стратификация H_2 при выходе основной массы водорода



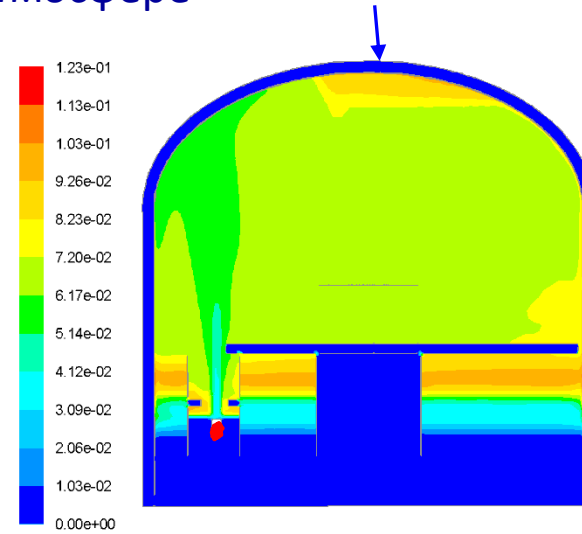
$t=16088$ c

Разрушение стратификации струёй пара, (аналог: см. OECD/SETH-2 ST1_7-2)



$t=17100$ c

После перемешивания - локальная конденсация у верхней стенки и выравнивание H_2 в перемешанной атмосфере



$t=18288$ c

Расчёт во времени:

- состав атмосферы;
- температура;
- давление;
- температура стен;
- действие систем безопасности.

Требуемый результат: оптимизация систем безопасности.

Водород вверху рассеивается, внизу его распределение относительно стабильно, возможны малые локальные скопления водорода (неопасные) при конденсации пара

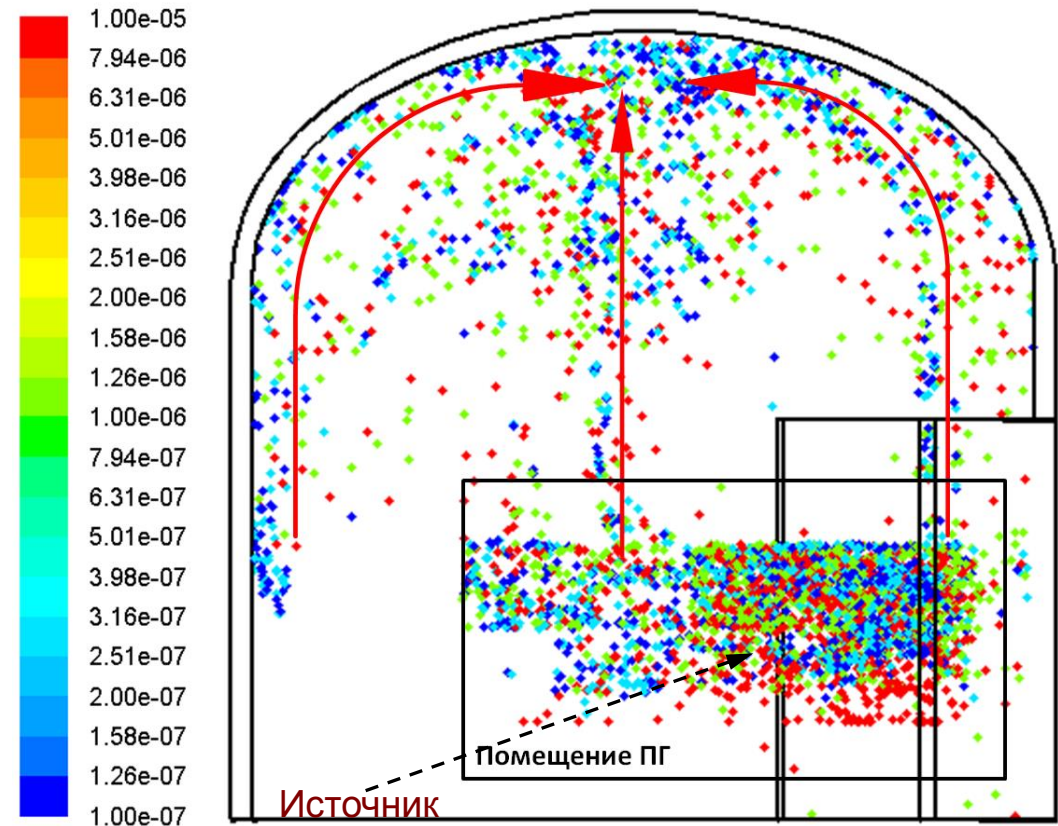
Расчёты движения (радиоактивных) аэрозолей – двухфазная CFD (FLUENT)

Задано –

- Модель DPM с заданными характеристиками частиц-аэрозолей.
- Выход из течи в помещение ПГ вместе с газом частиц субмикронного и микронного размера (распределение).
- Осаждение частиц на стенах (физика) не моделировалось: только условие поглощения стенкой (оболочка) или отражения (остальные).

Получено –

- Частичная седиментация в помещении ПГ и захват выходящим потоком газа. **Не проникают в верхний лёгкий слой.**
- Под куполом – вынос вверх, перемешивание, постепенное оседание (та же седиментация, крупные частицы оседают быстрее ...).



Распределение частиц, окрашены по величине диаметра ($10^{-7} - 10^{-5}$ м):

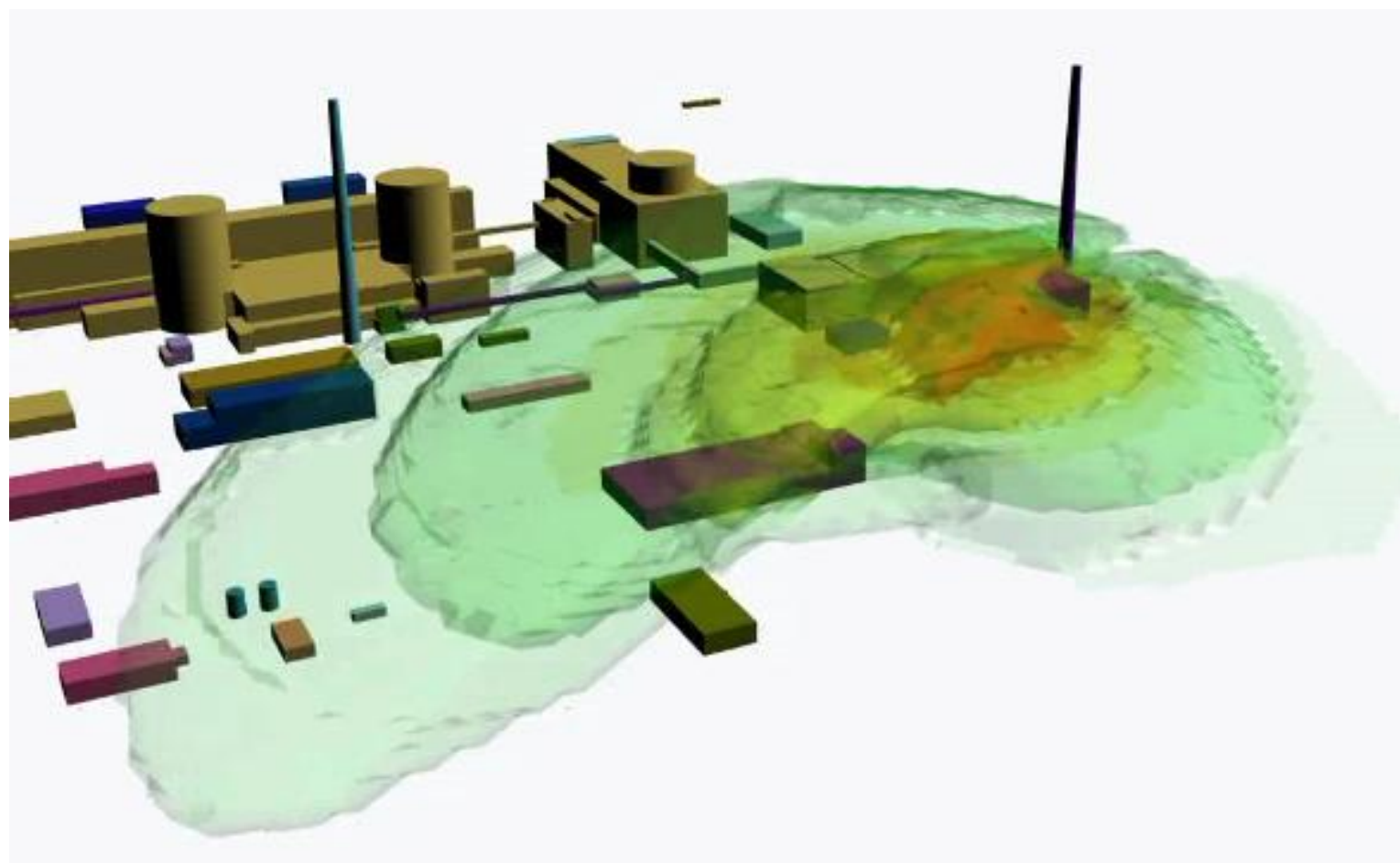
- под куполом – перемешиваются,
- много остаётся в помещении ПГ.

Результат: степень осаждения частиц и влияние этого на состояние, выход ПД и активности наружу

Промплощадка: распространение аварийного выброса (с учётом ветра)

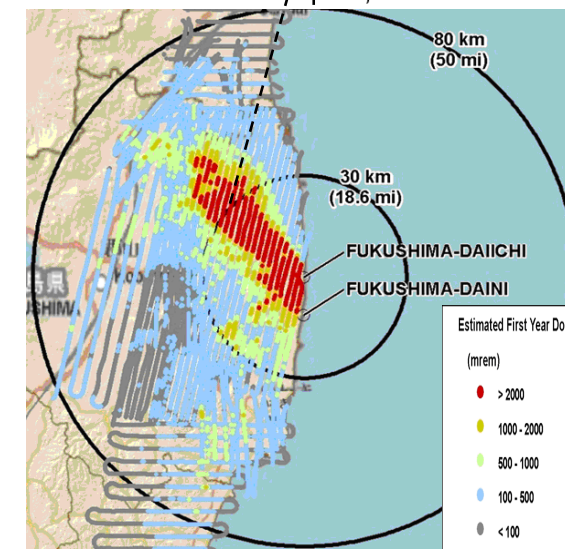
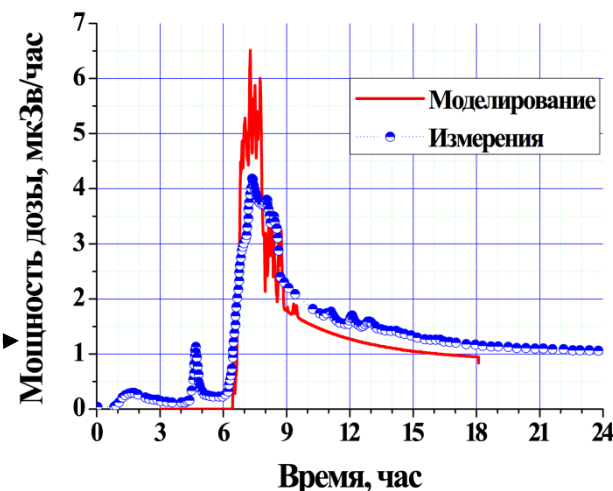
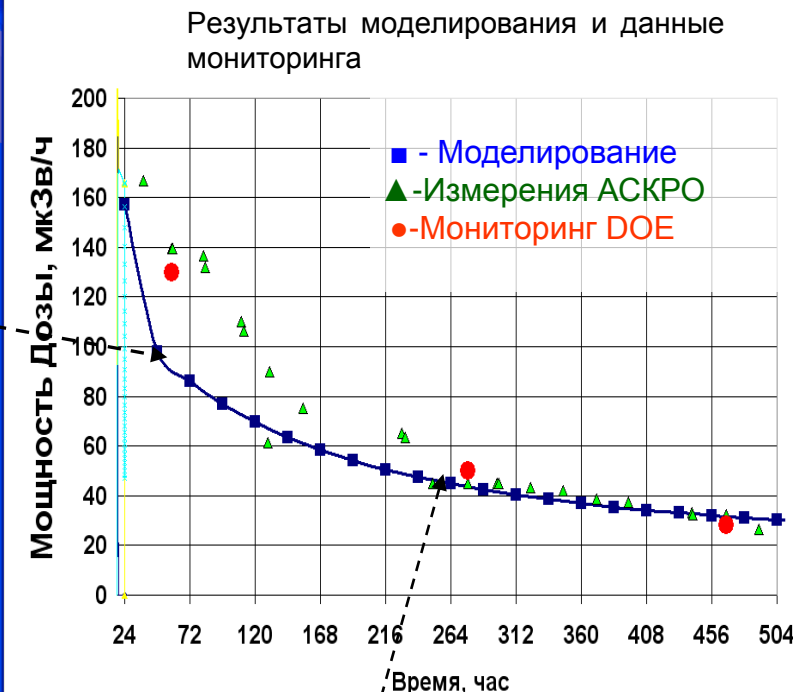
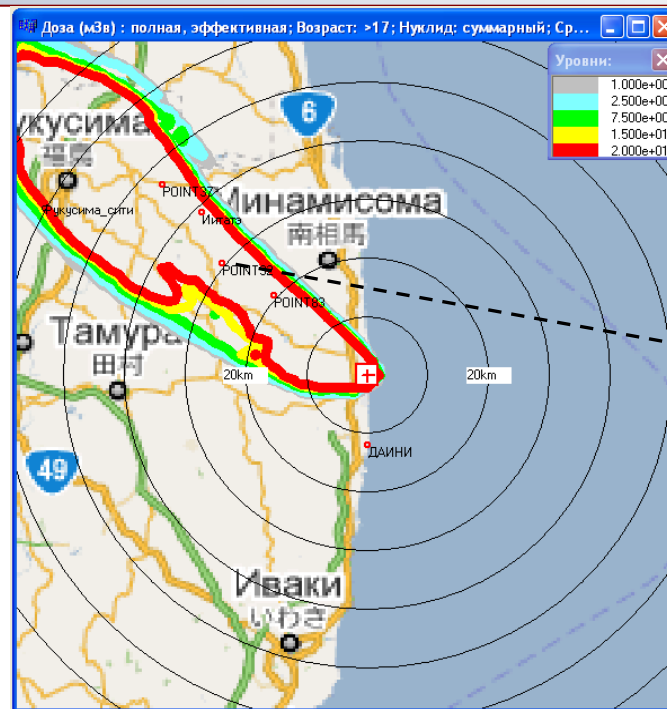
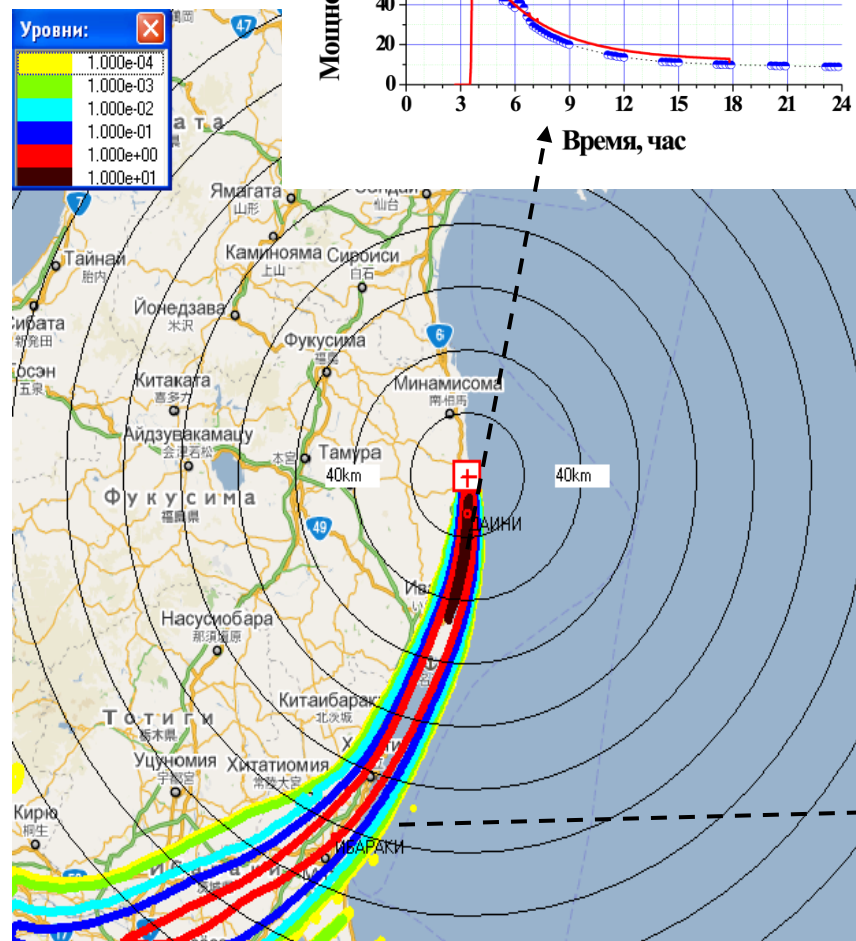
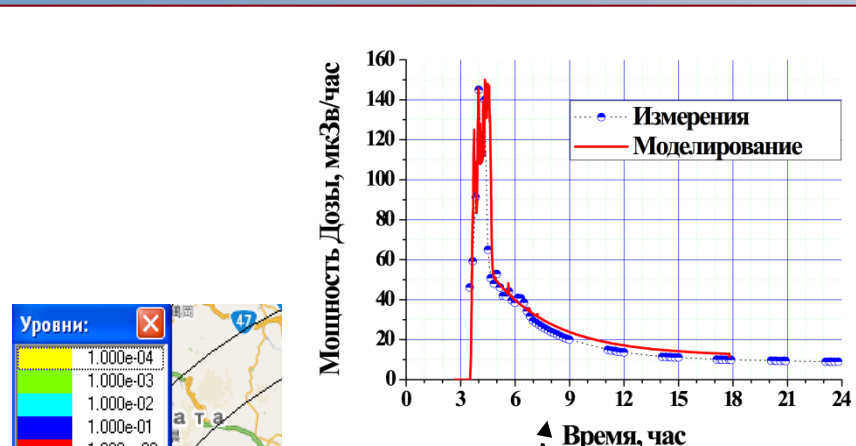
В случае выброса радиоактивности, основная задача – оценка распространения ПД

- Распространение облака: концентрация загрязнения после аварийного выброса активности
- Использование параллельных 3D вычислений на суперкомпьютере для CFD оценок локальной радиационной обстановки



Результаты расчета: поверхности уровня объемной концентрации радиоактивной примеси

~100 км : моделирование и измерения аварийного выброса АЭС Фукусима



Заключение

- Требования энергетической безопасности делают ядерную энергетику безальтернативной – это необходимый компонент промышленной энергетики будущего;
- Безопасность функционирования АЭС – залог успешного развития ЯЭ во всём мире;
- При невозможности прямого экспериментирования с аварийными событиями и разрушениями на АЭС роль численного моделирования исключительна;
- Это определяет высокие требования к физическому наполнению моделей, вычислительно-математическим основам, алгоритмизации, оценкам точности;
- Несмотря на ряд успехов, говорить о завершённости нынешних численных моделей аварийных режимов не приходится – слишком сложна задача. Новые проекты требуют новых подходов;
- Адекватность моделей зависит от развития средств моделирования, знания самого объекта – физики происходящего и техники АЭС, математической и вычислительной культуры – умения вычислить и проверить результат;
- Развитие численных моделей аварий и анализ результатов требуют высокой научной и технической квалификации, широкого кругозора – разработчика, пользователя и потребителя результатов расчётных средств.

